

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FAUSTO AUGUSTO DE SOUZA

MODELO BASEADO EM SISTEMA MULTIAGENTE PARA AUTORECUPERAÇÃO
COM CORTE SELETIVO DE CARGA E ILHAMENTO COM GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

CURITIBA

2015

FAUSTO AUGUSTO DE SOUZA

MODELO BASEADO EM SISTEMA MULTIAGENTE PARA AUTORRECUPERAÇÃO
COM CORTE SELETIVO DE CARGA E ILHAMENTO COM GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Clodomiro Unsihuay Vila

Coorientador: Prof. Dr. Fabrício Enembreck

CURITIBA

2015

S729m

Souza, Fausto Augusto de

Modelo baseado em sistema multiagente para autorrecuperação com corte seletivo de carga e ilhamento com geração distribuída para redes elétricas inteligentes/ Fausto Augusto de Souza. – Curitiba, 2015.
147 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2015.

Orientador: Clodomiro Unsuhuay Vila – Co-orientador: Fabrício Enembreck.

Bibliografia: p. 138-144.

1. Redes elétricas inteligentes. 2. Inteligência artificial distribuída. 3. Eletrônica de potência. I. Universidade Federal do Paraná. II. Vila, Clodomiro Unsuhuay. III. Enembreck, Fabrício. IV. Título.

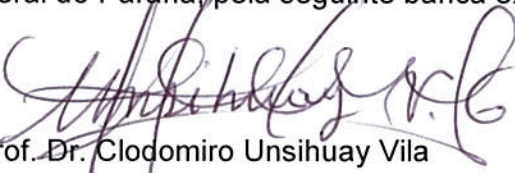
CDD: 621.319


TERMO DE APROVAÇÃO

FAUSTO AUGUSTO DE SOUZA

MODELO BASEADO EM SISTEMA MULTIAGENTE PARA AUTORECUPERAÇÃO COM CORTE SELETIVO DE CARGA E ILHAMENTO COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

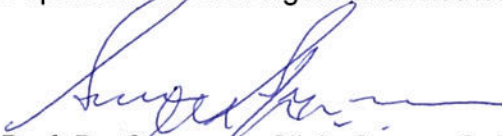
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:


Orientador: Prof. Dr. Clodomiro Unsihuay Vila
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR


Coorientador: Prof. Dr. Fabricio Enembreck
Programa de Pós-Graduação em Informática, PUCPR


Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR


Prof. Dr. Odilon Luís Tortelli
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR


Prof. Dr. Cresencio Silvio Segura Salas
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia dos Institutos, LACTEC

Curitiba, 28 de Agosto de 2015.

*"Eu te amarei, ó SENHOR, fortaleza minha.
O Senhor é o meu rochedo, e o meu lugar forte, e o meu libertador; o meu Deus, a minha
fortaleza, em quem confio; o meu escudo, a força da minha salvação, e o meu alto refúgio".*

Salmos 18:1,2

"Bem-aventurado aquele que teme ao SENHOR e anda nos seus caminhos".

Salmos 128:1

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo que tens feito, pelo dom da vida, pela força, graça e sabedoria para mim e minha família.

A minha esposa Djane e meus filhos Arthur e Vinicius pela paciência e dedicação. Pelo carinho e pelas palavras de incentivo.

Aos meus pais Maria dos Santos Augusto e Aparecido Carlos de Souza (*in memorian*) por terem me dado educação, valores e pela força e incentivo neste período de estudo.

Ao Prof. Dr. Clodomiro Unsihuay Vila e ao Prof. Dr. Fabricio Enembreck pela orientação e confiança, pela disposição em orientar e pelo direcionamento das pesquisas. Muito obrigado.

Ao colega Laercio pelo tempo disponibilizado e pelo auxílio, por compartilhar conhecimentos em desenvolvimento do software.

Aos Professores do programa PPGEE/UFPR, em especial aos professores Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki, Prof. Dra. Thelma Solange Piazza e Prof. Dr. Odilon Luís Tortelli pelo incentivo, conhecimento, ensino e pelo o apoio prestado durante o período do mestrado.

Aos amigos e colegas do programa PPGEE/UFPR, pelos momentos de aprendizado partilhados.

A todos os amigos e colegas da Copel Distribuição S.A., que de alguma forma colaboraram com compartilhamento de conhecimentos, apoio moral e incentivo.

RESUMO

As redes de distribuição de energia no contexto das redes elétricas inteligentes caracterizam-se por ter alta confiabilidade, sistema de autorrecuperação, autossuficiência e características interativas no sistema. Uma funcionalidade importante em redes elétricas inteligentes é a autorrecuperação, pois utiliza algoritmos para tomada de medidas preventivas e corretivas para tratar as faltas depois que elas ocorrem no sistema. Este trabalho apresenta uma proposta de metodologia baseada em sistema multiagente (SMA) para autorrecuperação com corte seletivo de cargas e ilhamento com geração distribuída. O processo operacional do sistema de autorrecuperação proposto é realizado em quatro etapas, sendo a primeira etapa a identificação e o isolamento da falha, a segunda e terceira etapas correspondem ao processo de negociação para transferência das cargas fora de serviço, seguido da etapa quatro na qual acontecem o ilhamento e o corte de carga, caso necessário. O sistema multiagente visa resolver o problema de autorrecuperação da rede de distribuição, que neste trabalho é desenvolvido em uma plataforma chamada JADE. A plataforma JADE é um ambiente desenvolvido em Java e serve especificamente para simulações com sistemas baseados em agentes. Na metodologia proposta há uma interação com um aplicativo de fluxo de carga (MATPOWER) para a determinação do estado operativo do sistema elétrico no instante de pré-falta e de pós-recuperação. Assim, a funcionalidade do fluxo de carga poderá verificar se a solução sugerida pelo sistema multiagente irá operar adequadamente e indicar ou prevenir situações inadequadas de operação no estágio de pós-recuperação. Por tanto, as contribuições desta dissertação no processo de autorrecuperação de redes elétricas inteligentes, referem-se à implementação do processo de ilhamento intencional com corte seletivo de carga considerando a existência de geração distribuída, e a implementação do processo de identificação/ isolamento da falta realizados pelos Agentes Dispositivo “Inteligentes”, denominado neste trabalho de Agente Dispositivo. Estudos de caso utilizando um sistema composto por duas subestações, quatro alimentadores e setenta barras foram elaborados e comparados com a metodologia base, a fim de testar a metodologia proposta implementada neste trabalho. As simulações apresentadas nesta dissertação compreendem em uma falta em um determinado ramo da rede de distribuição. As análises dos resultados apresentados são referentes às tensões mínimas nas barras de carga, perdas, ações de chaveamento, bem como as cargas que ficaram fora de serviço e as restauradas. A análise dos resultados contempla uma comparação com a metodologia base, na qual a metodologia proposta neste trabalho foi inspirada. Os resultados obtidos mostram que o modelo proposto atende os objetivos deste trabalho e mostra a importância de se ter um sistema de autorrecuperação com corte seletivo de carga e ilhamento com geração distribuída.

Palavras-chave: Redes Elétricas Inteligentes. Autorrecuperação. Sistemas Multiagente. Geração distribuída. Ilhamento e Corte seletivo de carga.

ABSTRACT

The power distribution networks in the context of smart grids is characterized by having high reliability, self-healing system, self-sufficiency and interactive features on the system. An important feature in smart grids is the self-healing as it uses algorithms to take preventive and corrective measures to address the faults after they occur in the system. This work proposes a methodology based on multi-agent system (MAS) to self-healing with selective load shedding and islanding with distributed generation. The operational process of the proposed self-healing system is accomplished in four stages, the first stage includes identification and isolation of the fault, the second and third step correspond to the trading process to transfer the loads out of service, these steps are followed by the fourth stage that consists of the islanding process and the load shedding if necessary. The multi-agent system aims to solve the problem of self-healing distribution network, and in this work it is developed in a platform named JADE. JADE platform is an environment developed in Java, and specifically caters for simulations in agents based systems. There is an interaction with a load flow application (MATPOWER) for determining the operating status of the electrical system at the moment of pre-fault and post-recovery in the methodology proposed. Thus, the functionality of load flow can verify that the solution suggested by the multi-agent system is going to operate properly and indicate or prevent operation of inappropriate situations in the post-recovery stage. Therefore, the contributions of this work refers to the modeling and implementation of intentional islanding step process considering the existence of distributed generation in self-healing process of smart grids, and modeling and implementation of identification / isolation of the fault in the first stage performed by the device agents "Smart", herein called working device Agent. Case studies using a system composed of two substations, and seventy four feeders were prepared and compared with the base case, in order to test the method proposed in this research. The simulations presented in this study include a fault in a particular branch of the distribution network. The results analysis presented are for the minimum stresses in the load bus, losses, switching actions as well as the charges that were out of service and the restored ones. The analysis includes a comparison with the base case, which the methodology proposed in this paper was inspired. The results show that the proposed model meets the goals and shows the importance of having a self-healing system with selective load shedding and islanding with distributed generation.

Keywords: Smart Grids. Self-healing. Multi-agent systems. Distributed generation. Islanding and selective load shedding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1.1 – EXEMPLO ESQUEMÁTICO DE UMA REDE ELÉTRICA INTELIGENTE.....	17
FIGURA 1.2 – DEC E FEC ANUAL COPEL DISTRIBUIÇÃO S. A.....	20
FIGURA 2.1 – MODELO CONCEITUAL <i>SMART GRID</i>	32
FIGURA 2.2 – MODELO CONCEITUAL DE <i>SMART GRID</i> , DOMÍNIO DISTRIBUIÇÃO.....	34
FIGURA 2.3 – BENEFÍCIOS DE UMA REDE ELÉTRICA INTELIGENTE	36
FIGURA 2.4 – OITO FILOSOFIAS DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	37
FIGURA 2.5 – CONVERGÊNCIA DAS TECNOLOGIAS APLICADAS.....	39
FIGURA 2.6 – INTEGRAÇÃO DOS BLOCOS DE PESQUISA.....	40
FIGURA 2.7 – ESTRUTURA DE UM SISTEMA MULTIAGENTES	49
FIGURA 2.8 – MODELO DE REFERÊNCIA DE GERENCIAMENTO DE AGENTE	52
FIGURA 2.9 – ESTRUTURA DE MENSAGEM FIPA	54
FIGURA 2.10 – CICLO DE VIDA DE UM AGENTE	55
FIGURA 3.1 – ARQUITETURA DE UMA MICRORREDE	63
FIGURA 3.2 – EXEMPLOS DOS POSSÍVEIS TIPOS DE ILHAMENTO COM GD ...	67
FIGURA 4.1 – PROPOSTA DO MODELO DE AUTORRECUPERAÇÃO	79
FIGURA 4.2 – FLUXO DA INTERAÇÃO ENTRE MATLAB E JADE.	81
FIGURA 4.3 – ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO ENTRE OS AGENTES.....	82
FIGURA 4.4 – REDE ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO EXEMPLO, CONTENDO A ESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO E DISPOSIÇÕES DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA MULTIAGENTE DO MODELO PROPOSTO.....	83
FIGURA 4.5 – ESTRUTURA DO AGENTE DISPOSITIVO.....	87
FIGURA 4.6 – EXEMPLO DE REDE ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO COM CURTO CIRCUITO NA ZONA 2	88
FIGURA 4.7 – ESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO ENTRE AGENTES DISPOSITIVO	89
FIGURA 4.8 – ESTRUTURA LÓGICA PARA DETECÇÃO DE ZONA	89
FIGURA 4.9 – EXEMPLO DE REDE ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO MOSTRANDO DA ESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO E DISPOSIÇÕES DOS EQUIPAMENTOS DO MODELO PROPOSTO, COM CURTO CIRCUITO NA ZONA 6.	91

FIGURA 4.10 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO IDENTIFICAÇÃO E ISOLAR FALHA.....	92
FIGURA 4.11 – FLUXOGRAMA DA SEGUNDA ETAPA DO PROCESSO DE RESTAURAÇÃO.....	95
FIGURA 4.12 – FLUXOGRAMA DA TERCEIRA ETAPA DO PROCESSO DE RESTAURAÇÃO.....	100
FIGURA 4.13 – REDE DE DISTRIBUIÇÃO EXEMPLO	101
FIGURA 4.14 – FLUXOGRAMA DA QUARTA ETAPA DO PROCESSO DE RESTAURAÇÃO.....	106
FIGURA 5.1 – EXEMPLO SISTEMA TESTE COM QUATRO ALIMENTADORES E DUAS SUBESTAÇÕES	115
FIGURA 5.2 – REDE DE DISTRIBUIÇÃO COM QUATRO ALIMENTADORES E DUAS SUBESTAÇÕES	123
FIGURA 5.3 – RESULTADO DO CHAVEAMENTO DA METODOLOGIA PROPOSTA: FALTA NO TRECHO 31.....	130
FIGURA 5.4 – COMPARAÇÃO ENTRE TENSÕES MÍNIMAS DAS METODOLOGIAS IMPLEMENTADAS.....	131
FIGURA 5.5 – COMPARAÇÃO ENTRE AS PERDAS DAS METODOLOGIAS IMPLEMENTADAS.....	132
FIGURA 5.6 – COMPARAÇÃO ENTRE CARGAS RESTAURADAS E PERDAS DAS METODOLOGIAS IMPLEMENTADAS.....	133

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – ÍNDICES DE CONTINUIDADE DEC E FEC	20
TABELA 1.2 – COMPENSAÇÃO DOS ÍNDICES DE CONTINUIDADE DEC E FEC 20	
TABELA 3.1 – RESUMO DOS SISTEMAS DE AUTORRECUPERAÇÃO UTILIZADOS EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES.....	76
TABELA 4.1 – DADOS DAS ZONAS FORA DE SERVIÇO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO EXEMPLO.....	101
TABELA 4.2 – COMBINAÇÕES POSSÍVEIS DAS ZONAS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO EXEMPLO.....	102
TABELA 4.3 – TABELA DE COMBINAÇÕES DAS ZONAS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO EXEMPLO.....	102
TABELA 4.4 – OS NÍVEIS E PESO DE PRIORIDADE	107
TABELA 5.1 – RELAÇÃO DAS METODOLOGIAS A SEREM COMPARADAS.....	113
TABELA 5.2 – DIFERENÇA ENTRE O METODOLOGIA BASE E METODOLOGIA PROPOSTA IMPLEMENTADA	114
TABELA 5.3 – RESULTADOS DOS VALORES DE DEMANDA DO SISTEMA SEM GD: FALTA NO TRECHO 52	116
TABELA 5.4 – RESULTADOS REFERENTES A PRIMEIRA ETAPA DA METODOLOGIA: FALTA NO TRECHO 52 SEM GD.....	117
TABELA 5.5 – SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO DA FALTA NO TRECHO 52 SEM GD.....	118
TABELA 5.6 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PRÉ-FALTA E PÓS- RECONFIGURAÇÃO: FALTA NO TRECHO 52 SEM GD.....	119
TABELA 5.7 – RESULTADOS DOS VALORES DE DEMANDA DO SISTEMA COM GD: FALTA NO TRECHO 52	120
TABELA 5.8 – RESULTADOS REFERENTES A PRIMEIRA ETAPA DA METODOLOGIA: FALTA NO TRECHO 52 COM GD	120
TABELA 5.9 – SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO DA FALTA NO TRECHO 52 COM GD.....	121
TABELA 5.10 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PRÉ-FALTA E PÓS- RECONFIGURAÇÃO: FALTA NO TRECHO 52 COM GD.....	122

TABELA 5.11 – VALORES DE DEMANDA DO SISTEMA COM GD: FALTA NO TRECHO 31	124
TABELA 5.12 – RESULTADOS REFERENTES À PRIMEIRA ETAPA DA METODOLOGIA: FALTA NO TRECHO 31	125
TABELA 5.13 – DADOS COMPARATIVOS DA NEGOCIAÇÃO DOS AGENTES ALIMENTADORES: FALTA NO TRECHO 31	126
TABELA 5.14 – TRANSFERÊNCIA DE CARGA DO VIZINHO “OPÇÃO 1” PARA O VIZINHO “OPÇÃO 2”: FALTA NO TRECHO 31	127
TABELA 5.15 – SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO DA FALTA NO TRECHO 31 DA METODOLOGIA BASE IMPLEMENTADA.....	127
TABELA 5.16 – SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO DA FALTA NO TRECHO 31 DA METODOLOGIA PROPOSTA IMPLEMENTADA.....	128
TABELA 5.17 – RESULTADOS DE PÓS-RESTAURAÇÃO DA FALTA NO TRECHO 31 DE AMBAS AS METODOLOGIAS IMPLEMENTADAS	129
TABELA 5.18 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PRÉ-FALTA E PÓS-RECONFIGURAÇÃO: FALTA NO TRECHO 31.....	129

LISTA DE SIGLAS

AAL	Agente Alimentador
ACC	Agente do Canal de Comunicação, do Inglês <i>Agent Communication Channel</i>
ACL	Linguagem de comunicação do Agente, do Inglês <i>Agent Communication Language</i>
AGD	Agente de Geração Distribuída
AD	Agente Dispositivo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AZ	Agente Zona
CDA	Capacidade Disponível no Alimentador
CFP	Chamada de Proposta, do Inglês <i>Call for Proposal</i>
BDI	Arquitetura de um agente referente à Crença, ao Desejo e às Intenções, do Inglês <i>Belief–Desire–Intention</i>
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DICRI	Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção individual por Unidade Consumidora
FIPA	Fundação de Agentes Físicos Inteligentes, do Inglês <i>Foundation for Intelligent Physical Agents</i>
GD	Geração distribuída
IA	Inteligência Artificial

IAD	Inteligência Artificial Distribuída
IEEE	Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica, do Inglês <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IED	Dispositivos Eletrônicos Inteligentes, do Inglês <i>Intelligent Electronic Device</i>
MAS	Sistema de Gerenciamento de Agente, do Inglês <i>Agent Management System</i>
MT	Média tensão
MTS	Serviço de Transporte de Mensagem, do Inglês <i>Message Transport Service</i>
PRODIST	Procedimento de Distribuição
REI	Redes Elétricas Inteligentes
RD	Recursos Distribuídos
RDE	Recursos Distribuídos de Energia
RDP	Resolução Distribuída de Problemas
SCADA	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados, do Inglês <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
TF	Transformador de Força
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SMA	Sistema Multiagente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo geral.....	22
1.2.2	Objetivos específicos.....	22
1.3	JUSTIFICATIVA	23
1.4	METODOLOGIA E CONTRIBUIÇÕES	24
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1	REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	26
2.1.1	Dispositivos de Seccionamento e Proteção.....	27
2.1.2	Automação da rede de distribuição	28
2.2	REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	31
2.3	AUTORRECUPERAÇÃO	41
2.4	TECNOLOGIAS DE AGENTES DE SOFTWARE E SISTEMAS MULTIAGENTE	45
2.4.1	Inteligência Artificial distribuída.....	45
2.4.2	Agentes	47
2.4.3	Sistemas Multiagente	49
2.4.4	Padrões para desenvolvimento de SMA.....	51
2.4.5	Plataforma JADE	57
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	58
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	59
3.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	59
3.1.1	Microrredes e Geração Distribuída	62
3.2	ILHAMENTO EM REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO	65

3.3	CORTE DE CARGA EM REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO	70
3.4	AUTORRECUPERAÇÃO EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES COM SISTEMA MULTIAGENTES	71
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	77
4	PROPOSTA DE UM MODELO PARA AUTORRECUPERAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES UTILIZANDO UMA ABORDAGEM MULTIAGENTE ..	78
4.1	PROPOSTA DO MODELO DA METODOLOGIA.....	78
4.2	ESTRUTURA E COMUNICAÇÃO DOS AGENTES	82
4.3	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO ALGORITMO.....	84
4.3.1	Restrições da rede de distribuição.....	85
4.3.2	Identificação e Isolamento da Falha Utilizando Esquema de Proteção ..	85
4.3.3	Restauração da Rede de Distribuição	92
4.4	CÁLCULO DA CAPACIDADE DISPONÍVEL NO ALIMENTADOR – CDA ..	108
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	111
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	112
5.1	CASO I – FALTA NO ALIMENTADOR 4 TRECHO 52.....	114
5.1.1	Resultados das simulações sem considerar geração distribuída	116
5.1.2	Resultados das simulações considerando geração distribuída	119
5.2	CASO II – FALTA NO ALIMENTADOR 3 TRECHO 31	122
5.2.1	Análise comparativa	131
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	134
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	135
6.1	CONCLUSÃO	135
6.2	TRABALHOS FUTUROS	136
	REFERÊNCIAS.....	138
	APÊNDICE A – DADOS DE ENTRADA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO.....	145

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Com os avanços tecnológicos e o crescimento econômico, houve uma crescente demanda por energia, além da necessidade de mais qualidade do fornecimento de energia elétrica, de se atender demandas ambientais e de conservação de energia por meio de uma rede mais confiável. Devido a isso, as empresas distribuidoras e mantenedoras de sistemas de distribuição estão buscando alternativas na automação e monitoramento de sistemas elétricos de distribuição para melhorar a qualidade no fornecimento de energia e disponibilidade do serviço. Frente a essa demanda surgiu o conceito de *smart grid*, ou “Redes Elétricas Inteligentes”. Esse conceito é muito amplo, pois reúne aplicações nas mais diversas áreas do setor, como eficiência energética, geração distribuída com fontes renováveis, resposta à demanda, medição eletrônica, qualidade de energia e automação de redes elétricas.

Redes Elétricas Inteligentes é um tema discutido mundialmente e sua formatação teve início no começo da última década. Por se tratar de um conceito, e não de um produto, a sua interpretação, motivação, abrangência e desafios são encontrados de formas diferentes entre países e até mesmo nas diversas regiões do Brasil.

Em CGEE (2012), Redes Elétricas Inteligentes é uma rede elétrica que utiliza tecnologia digital avançada para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade em tempo real com fluxo de energia e de informações bidirecionais entre o sistema de fornecimento de energia e o cliente final, integrando e possibilitando ações por todos os usuários conectados a ela, fornecendo eficientemente uma energia sustentável, econômica e segura. Os conceitos envolvidos em Redes Elétricas Inteligentes podem ser aplicados a outras infraestruturas semelhantes às das redes elétricas. Aplicações nas redes de abastecimento de água e de gases são exemplos de outros sistemas relacionados.

Segundo Brown e Suryanarayanan (2009), dez pontos definem Redes Eléctricas Inteligentes. De acordo com tais autores, as Redes Eléctricas Inteligentes fazem o uso de informações e controles digitais, otimização dinâmica de operações de rede e investigação, desenvolvimento e integração de fontes distribuída – especialmente de fontes renováveis –, desenvolvimento e utilização de resposta à demanda, implantação de tecnologias "inteligentes" para medição (AMI), comunicações e automação, a integração entre aparelhos "inteligentes", consumidores e dispositivos, uso de tecnologias de corte no pico de demanda – incluindo tecnologias avançadas de armazenamento – e fornecimento aos consumidores de informação oportuna, desenvolvimento de padrões para a comunicação e interligação de dispositivos "inteligentes" e identificação e redução das barreiras potenciais para adoção da rede "inteligente" (EISA, 2007). A Figura 1.1 apresenta um exemplo de um esquema que representa as tecnologias utilizadas em Redes Eléctricas Inteligentes, onde podem ser visualizados veículos elétricos, microgeração conectada à rede usando fontes solar e eólica, entre outros aspectos.

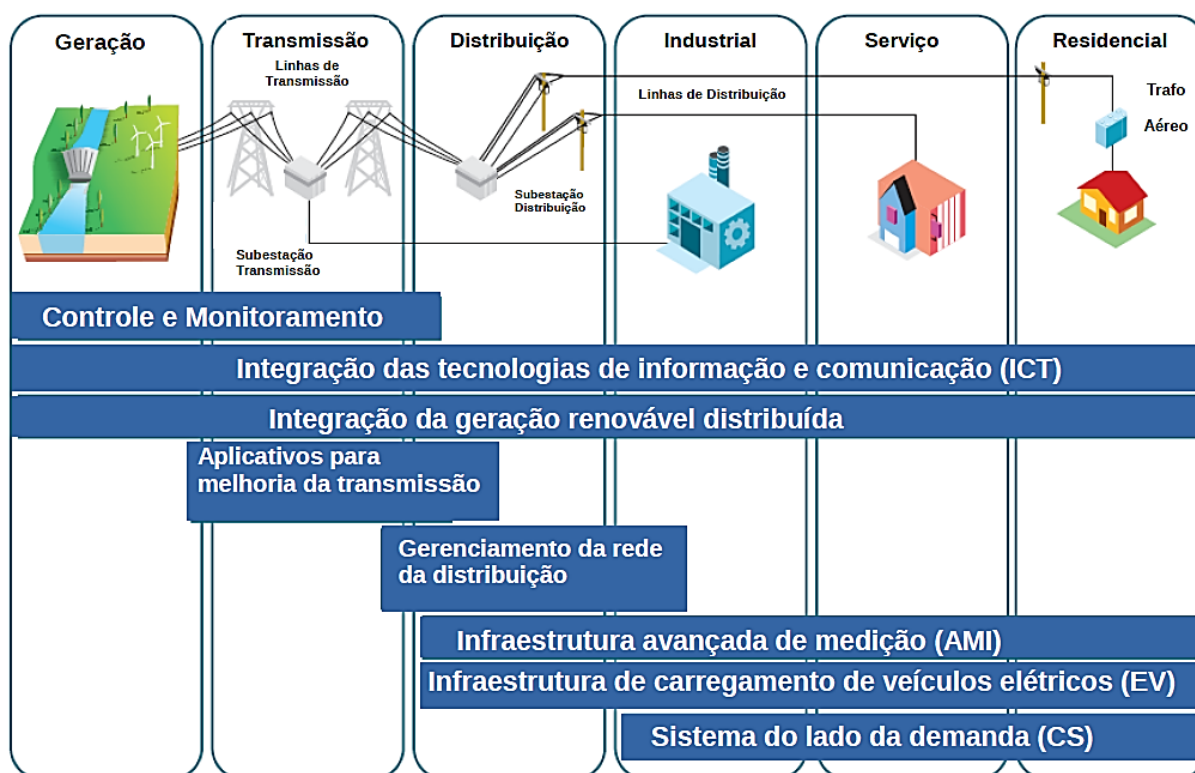


Figura 1.1 – Exemplo esquemático de uma Rede Elétrica Inteligente
Fonte: Adaptado de NIST (2010)

Nesse contexto, o investimento na automação das redes elétricas atuais e futuras é de suma importância para incorporação do conceito de Redes Elétricas Inteligentes. Com elas surgem oportunidades de negócio que precisam ser avaliadas e integradas ao planejamento estratégico das empresas de energia. A saber, novas fontes de energia e geração, armazenamento, transmissão, distribuição, carros elétricos, fontes distribuídas e conectividade com a rede em baixa tensão, consumo, demanda e compromissos dos usuários finais, confiabilidade, otimização e minimização do uso da energia, impacto e mitigação do impacto no meio ambiente, administração de ativos e do apoio às empresas de energia, controles e custos (retorno do investimento) (LIMA; JANNUZZI, 2011).

As Redes Elétricas Inteligentes podem proporcionar ao consumidor informações sobre o seu consumo, tarifa e qualidade do serviço e do produto recebidas em tempo real. Para viabilizar esses serviços, uma infraestrutura de telecomunicações é necessária para viabilizar esses serviços. Essa rede de telecomunicações deve funcionar interligando os dispositivos chamados *IEDs* – *Intelligent Electronic Devices* – trocando informações e ações de controle entre os diversos segmentos da rede elétrica de média tensão e de baixa como a medição do consumidor e sua instalação elétrica. Tal convergência de tecnologias deve exigir o desenvolvimento de novos métodos de controle, automação e otimização da operação do sistema elétrico, tendendo para utilização de técnicas de resolução distribuída de problemas baseadas na utilização de multiagentes (CGEE, 2012).

Dentre os benefícios de implantação de uma Rede Elétrica Inteligente está o conceito de *self-healing* (em Português, autorrecuperação) que é um dos conceitos mais significativos para que uma rede seja considerada inteligente. Ele refere-se à capacidade da rede de distribuição frente a um distúrbio, de isolar um problema e restaurar as cargas no menor tempo possível, reduzindo ao máximo o número de clientes afetados (AREFIFAR; MOHAMED; EL-FOULY, 2013). A complexidade de um sistema distribuição demanda soluções diferenciadas de automação que vão além de lógicas clássicas. Uma das soluções estudadas e aplicadas para resolução deste problema é a inteligência artificial (IA), a qual possibilita obter ações para resolução de problemas que se assemelham a ações de um ser humano.

A implantação de tal conceito nas redes elétricas das concessionárias no Brasil pode contribuir para a melhora nos índices de qualidade de energia estabelecidos pelo órgão regulador ANEEL, através dos Procedimentos de

Distribuição - PRODIST, módulo 8. De acordo com a ANEEL, esses são indicadores que aferem a qualidade de fornecimento de energia elétrica de determinada distribuidora, considerando os aspectos “frequência de interrupções” e “duração das interrupções”.

Os indicadores são determinados e aferidos por conjunto de unidades consumidoras da área de concessão como DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e por unidade consumidora DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora), FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora) e DMIC (Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora). Tal contribuição acarretará principalmente na redução de custos operacionais, dentre outros benefícios citados neste documento, para as concessionárias e consumidores.

É através do controle do número de interrupções, do cálculo e da divulgação dos indicadores de continuidade de serviço que as distribuidoras, os consumidores e a ANEEL podem avaliar a qualidade do serviço prestado e o desempenho do sistema elétrico. Para que uma interrupção seja considerada no cálculo dos indicadores é necessário que a mesma tenha uma duração maior que três minutos, sendo admitidos alguns expurgos na sua apuração.

A continuidade do fornecimento é avaliada pela ANEEL através de subdivisões das distribuidoras, denominadas Conjuntos Elétricos. Existem limites para indicadores associados a cada conjunto. Ressalta-se que o conjunto elétrico pode ter abrangência variada. Conjuntos grandes podem abranger mais de um município, do mesmo modo que alguns municípios podem possuir mais de um conjunto. Os limites dos indicadores DIC e FIC são definidos para períodos mensais, trimestrais e anuais, enquanto o limite do indicador DMIC é definido para períodos mensais. A Tabela 1.1 contém os índices de DEC e FEC apurados pela concessionária de energia Copel Distribuição em cinco anos e o DEC e FEC limite estipulados pelo órgão regulador ANEEL.

TABELA 1.1 – ÍNDICES DE CONTINUIDADE DEC E FEC

Índices de Continuidade					
COPEL-DIS					
	2010	2011	2012	2013	2014
DEC APURADO	11,46	10,64	10,25	11,63	14,01
DEC LIMITE	14,05	13,62	13,17	12,87	12,28
FEC APURADO	9,46	8,26	7,84	8,07	8,92
FEC LIMITE	12,84	12,02	11,12	10,71	10,05
Nº DE CONSUMIDORES	3.700.608	3.838.144	3.989.313	4.140.734	4.245.932

Fonte: ANEEL (2015)

A Figura 1.2 ilustra o índice de continuidade da empresa nos últimos anos, com ênfase no ano de 2014, em que a empresa superou os valores limites estipulados.

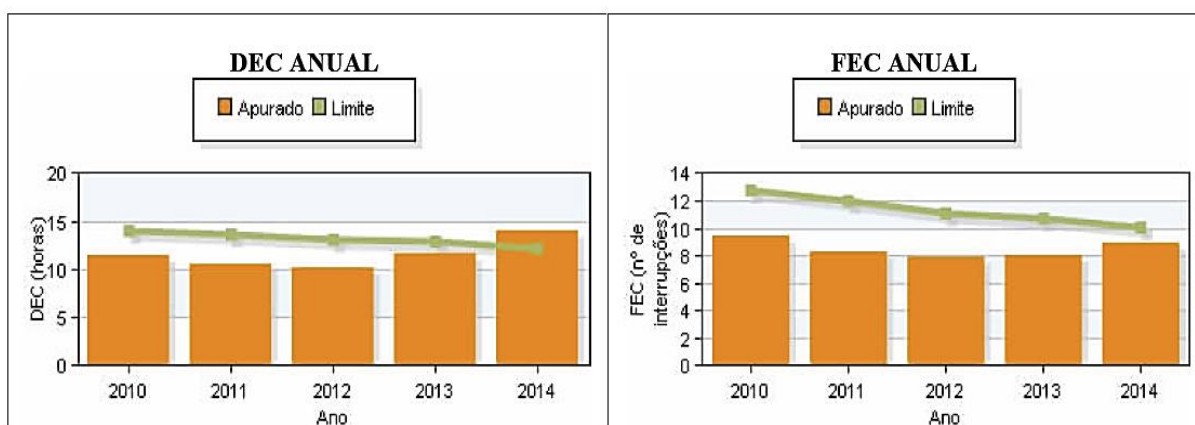


Figura 1.2 – DEC e FEC anual Copel Distribuição S. A.

Fonte: ANEEL (2015)

A Tabela 1.2 mostra os valores de compensação dos índices de continuidade da empresa no ano de 2014.

TABELA 1.2 – COMPENSAÇÃO DOS ÍNDICES DE CONTINUIDADE DEC E FEC

Índices de Compensação de Continuidade - Região SUL					
COPEL-DIS - 2014					
Compensações	DIC, FIC e DMIC DICRI			DICRI	Total
	Mensais	Trimestrais	Anuais	Mensais	
Quantidade das compensações	3.527.454	1.026.782	728.573	103.984	5.386.793
Valor das compensações (R\$)	9.982.450,65	1.111.176,78	3.502.568,74	467.108,90	15.063.305,07

Fonte: ANEEL (2015)

A baixa qualidade no fornecimento refletida pelos índices de DEC e FEC geram altos valores de compensações que as concessionárias de energia elétrica devem fornecer aos clientes. Com a implantação de um sistema de autorrecuperação, os valores a serem compensados para os clientes tendem a ser bem menores.

A implantação do conceito das Redes Elétricas Inteligentes deve integrar diferentes tecnologias com um alto potencial de benefícios. Além de viabilizar a modernização da rede de distribuição, elas possibilitam a integração de geração distribuída, veículos elétricos e outras metodologias que visam otimizar a demanda de uma rede elétrica de distribuição. Dentre essas metodologias está a autorrecuperação, que visa salvar os consumidores que ficam sem energia mediante um distúrbio causado na rede de distribuição. Isso, consequentemente diminui os efeitos causados pelos baixos índices de qualidade de energia.

Além do conceito de autorrecuperação, a inserção da geração distribuída na rede de distribuição possibilita o avanço nas pesquisas ao adicionar armazenamento de energia distribuída em conjunto com geração distribuída na rede de distribuição. Isso permite que grandes áreas continuem a operar como redes de energia autoalimentadas, ou seja, "em ilha" em caso de perda de alimentação (KEARNS; ALI, 2010). Esse conceito de ilha adicionado ao conceito de autorrecuperação tem sido objeto de pesquisa em alguns países como nos Estados Unidos e países da Europa por agregarem benefícios significativos à rede de distribuição.

No processo de autorrecuperação, para evitar que todas as cargas sejam desligadas devido ao desbalanceamento entre a geração e a demanda, faz-se necessário um planejamento de desligamento seletivo das cargas em função da sua importância pré-estabelecida.

Várias técnicas têm aplicadas a essas metodologias, sendo uma delas os sistemas multiagente. O benefício de se utilizar um sistema baseado em multiagentes para resolver o problema de autorrecuperação é a flexibilidade e capacidade de expandir o sistema, pois tal método considera um sistema de agentes flexíveis que responde de forma correta a situações dinâmicas, podendo ser expandido facilmente acrescentando agentes. Além disso, o controle deixa de ser centralizado, sendo obtido de forma autônoma e descentralizada pelos próprios agentes do sistema. A tecnologia baseada em multiagente se encontra inserida no contexto de inteligência artificial, mais precisamente no contexto de inteligência

artificial distribuída (IAD). Segundo Saraiva (2012), um sistema de inteligência artificial distribuída possui características similares às características de um sistema de *smart grids*, devido a diversas funcionalidades exigidas pelo sistema para atingir um único objetivo, podendo ser a autorrecuperação do sistema, a redução de perdas elétricas, dentre outros.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem o objetivo de aumentar a confiabilidade das redes de distribuição de energia elétrica no contexto das Redes Elétricas Inteligentes.

1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar os conceitos e o estado da arte de *smart grid* e do problema de *self-healing* em sistema de distribuição;
- Analisar trabalhos semelhantes que utilizam as técnicas de sistemas baseados em sistema multiagente para resolver o problema de restauração de rede;
- Implementar um modelo computacional baseado em sistemas multiagentes cooperativos, que são capazes de realizar a autorrecuperação de serviço de energia elétrica na rede de distribuição no contexto das Redes Elétricas Inteligentes;
- Incorporar um modelo de ilhamento de rede com geração distribuída e corte seletivo de carga ao modelo de autorrecuperação;
- Implementar a interação entre uma ferramenta computacional de fluxo de carga (MATPOWER) e a metodologia baseada em multiagente proposta, a qual é implementada em Java;

- Incorporar um modelo de identificação/isolamento da falha na primeira etapa pelos Agentes Dispositivo “Inteligentes”, denominado neste trabalho de Agente Dispositivo;
- Validar e testar a metodologia proposta usando sistema de distribuição de energia elétrica, considerando vários cenários.

1.3 JUSTIFICATIVA

Nos sistemas de distribuição de energia elétrica cada vez mais há necessidade por mais qualidade no fornecimento de energia elétrica, que por sua vez gerou a necessidade de se aplicar novos conceitos e metodologias dentro de um contexto de Redes Elétricas Inteligentes. Nesse aspecto, o investimento na modernização das redes elétricas é de suma importância e tem sido uma temática debatida em âmbito mundial. Os benefícios gerados pela modernização das Redes Elétricas Inteligentes constituem a motivação das entidades governamentais e empresas privadas para investir na implementação de tal conceito.

Este trabalho partilha da mesma motivação, visando contribuir com soluções para a melhoria dos índices de qualidade de energia e aumentar a disponibilidade no fornecimento de energia no contexto das Redes Elétricas Inteligentes. Entre elas, a identificação da falta, o isolamento e o restabelecimento dos trechos sem falta realizados de forma automática. Como consequência, a metodologia aqui apresentada pode contribuir para a redução do custo operacional de uma concessionária, tempo de atendimento e diminuição do número de clientes fora de serviço. Além do aspecto técnico e econômico, as ações de tomada de decisão podem auxiliar no aspecto operacional, com o uso da inteligência artificial distribuída que permite implementar funcionalidades importantes que ainda são realizadas por humanos, como a de autorrecuperação. Como contribuição adicional desse trabalho destaca-se o estudo para isolamento em situações de contingência. Isso porque a implementação dessa funcionalidade em conjunto com a autorrecuperação com corte seletivo de carga é relevante para evitar interrupções indesejadas em cargas importantes como hospitais, delegacias, quartéis de bombeiros e prédios públicos.

1.4 METODOLOGIA E CONTRIBUIÇÕES

A metodologia proposta foi inspirada no trabalho apresentado por Zidan; El-Saadany (2012). O modelo de autorrecuperação apresentado foi dividido em quatro etapas, sendo cada uma delas parte do processo para restaurar as cargas fora de serviço.

Além de um sistema de autorrecuperação, foi proposto no modelo o ilhamento intencional das zonas que ficaram fora de serviço seguido de corte seletivo de carga.

Como uma contribuição neste trabalho, o ilhamento pode ocorrer nas situações em que o modelo de autorrecuperação identificar que não existe a possibilidade de atender uma determinada carga que tem prioridade no atendimento. Nesse caso, se o sistema identificar que a geração distribuída na zona do ilhamento não tem condições de assumir todas as cargas, será aplicado o corte seletivo de carga naquelas menos prioritárias. Para que a zona ilhada possa ser atendida de forma segura, sugere-se o uso de uma energia gerada pela geração distribuída que seja o mais constante possível, por exemplo, célula combustível de hidrogênio ou outras fontes renováveis como a tecnologia de armazenamento de energia, em Inglês *energy storage technology*.

Neste trabalho, o corte seletivo de carga está incorporado na metodologia de autorrecuperação, sendo executado na quarta etapa. Porém, somente é executado quando não existir mais possibilidade de restaurar as cargas que ficaram fora de serviço e não existir condição de ilhamento intencional. A sua tomada de decisão está baseada nas prioridades das cargas, toda vez que houver necessidade de corte de carga serão cortadas começando com as de menor prioridade, inclusive na área onde ocorre o ilhamento intencional.

Na metodologia proposta, há interação entre o JADE e um aplicativo de fluxo de carga (MATPOWER) para a determinação do estado operativo do sistema elétrico no instante de pré-falta. Além disso, é possível verificar se o sistema com a solução sugerida pelo sistema multiagente proposta neste trabalho, irá operar adequadamente e indicar ou prevenir situações inadequadas de operação no estágio pós-recuperação. Assim, outra contribuição deste trabalho é a implementação do processo de corte carga também no ilhamento intencional.

A abordagem considera que cada unidade de geração distribuída possui seu controle de tensão e frequência.

Assim sendo, as contribuições desta dissertação referem-se à modelagem e implementação do processo de ilhamento intencional com corte seletivo de carga considerando a existência de geração distribuída no processo de autorrecuperação de redes elétricas inteligentes, e na modelagem e implementação da identificação/isolamento da falta na primeira etapa realizada pelos Agentes Dispositivo “Inteligentes”, denominado neste trabalho de Agente Dispositivo.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em seis capítulos. No capítulo um, são apresentados uma contextualização, justificativa, objetivos e metodologia e contribuições do modelo proposto. No capítulo dois é apresentada uma fundamentação teórica sobre redes elétricas de distribuição e Redes Elétricas Inteligentes, bem como são explicitados os conceitos de autorrecuperação e tecnologia em sistemas de software e sistemas Multiagente incluindo a ferramenta de desenvolvimento de sistema Multiagente, a plataforma JADE. O capítulo três traz a revisão de literatura, que contempla os conceitos de Geração Distribuída no contexto de Redes Elétricas Inteligentes, Microrredes, Ilhamento e Corte de carga em redes elétricas de distribuição. O capítulo quatro apresenta a metodologia proposta e os comportamentos dos agentes durante a recomposição do sistema de distribuição para faltas no alimentador. No Capítulo cinco são demonstrados os resultados das simulações e análise dos resultados das simulações. E, finalmente no capítulo seis, apresentam-se as conclusões obtidas a partir deste trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma explanação sobre tópicos considerados de fundamental importância para um melhor entendimento dos assuntos abordados no decorrer deste trabalho, tais como, redes elétricas de distribuição, conceitos de Redes Elétricas Inteligentes, autorrecuperação, tecnologia de agentes de software e sistemas multiagente.

2.1 REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO

As redes elétricas de distribuição são uma parte do Sistema Elétrico de Potência. Elas se dividem em sistema de subtransmissão e sistema de distribuição. O sistema de subtransmissão liga as subestações de alta tensão até as subestações de distribuição, sendo que essas estações normalmente são localizadas nos centros de carga. A tensão típica do sistema subtransmissão é entre 138 e 69 kV. A função dos sistemas de distribuição é captar a energia das subestações de distribuição e transferir aos consumidores, através de linhas trifásicas operando em tensões, usualmente, de 13,8 kV ou, mais raramente, em 34,5 kV, com capacidade de cerca de 12 MVA por circuito. O sistema de distribuição está dividido em dois tipos, primário e secundário. O sistema de distribuição primário se faz por linhas aéreas ou cabos subterrâneos, que são chamados alimentadores. Os alimentadores estão distribuídos ao longo das ruas e fornecem tensão aos transformadores de distribuição que passam ao nível secundário (120-380 V). Dentre os consumidores atendidos pela rede primária, destacam-se indústrias de porte médio, conjuntos comerciais (shopping centers), etc. (KARADY, 2000).

2.1.1 Dispositivos de Seccionamento e Proteção

O religador automático é um dispositivo de proteção que tem a função de interromper automaticamente um circuito abrindo e fechando seus contatos, repetidas vezes, em uma eventual falta nesse circuito que por ele está protegido. Um religador é basicamente constituído por um mecanismo automático, projetado para abrir e fechar circuitos em carga ou em curto-circuito, comandado por relés (IEDs) de sobrecorrente de ação indireta, que realizam as funções de proteção de sobrecorrente de fase ou neutro instantânea, função de sobrecorrente de fase ou neutro temporizado e por um relé com a função de religamento (ELETROBRÁS, 1982). Os dispositivos de controle de um religador são microprocessadores dedicados e realizam diversas funções de proteção, tais como as funções 50, 51, 79 e 67 definidas pela norma ANSI C37.2 (ANSI, 2008).

Sabendo que a maioria das faltas em linhas aéreas são transitórias (RUSH, 2011), os religadores são aplicados amplamente na proteção de alimentadores primários de distribuição. São instalados geralmente na saída de alimentadores da subestação e em pontos do tronco de circuitos de distribuição, onde, em alguns casos, se faz necessário diminuir a zona de proteção do equipamento a montante, em derivações longas e carregadas. Estão em circuitos que passam por áreas muito arborizadas e sujeitas a grande intensidade de descargas atmosféricas, e têm a função de auxiliar a minimizar os desligamentos permanentes (KARADY, 2000).

Chaves automáticas são chaves automatizadas instaladas na rede de distribuição que possuem um IED (*Intelligent Eletronics Device*) ou uma UTR (Unidade Terminal Remota), que realiza comunicação com centro de controle. Essas chaves podem ou não possuir inteligência. Normalmente são utilizadas somente para realização de manobras de forma remota e verificação dos valores de tensão, corrente e do estado da rede. Não possuem funções de proteção, pois o seu mecanismo de manobra não permite operação sobre falta.

Alguns religadores automáticos podem operar em três modos: (i) Em modo chave, que coloca o religador em um modo de operação de abertura por um operador. Colocar um religador em tal modo operacional pode parecer não intuitivo, mas traz alguns benefícios para um sistema de autorrecuperação. Nesse modo, o controle ainda recebe informações sobre as falhas e relatórios de falha. (ii) Em modo

seccionizador, que também desabilita a proteção de sobrecorrente em um religador. Nesse modo, o religador abre em função de uma perda de tensão durante o intervalo de religamento do dispositivo de proteção. Essa técnica é tradicionalmente utilizada em equipamentos que não tenham falhas, mas que sejam fáceis de coordenar. Para coordenação desse tipo de equipamento, um esquema seccionalização pode ser montado para colocar valores diferentes para contagem em cada dispositivo instalado em série ao longo do alimentador. Se a falha de corrente é detectada, a seccionalizadora incrementa sua contagem para cada religamento do intervalo de abertura que detecta a partir de uma perda de tensão. A desvantagem de uma seccionalizadora é que ela não oferece nenhuma proteção aos equipamentos da linha. Esse modo não é seguro para topologias com ramos de alimentação paralelas porque todos os dispositivos sobre os ramos contam o mesmo número de contagem. (iii) Em modo de religador, que é o modo de proteção clássico de um controlador de religador. Nesse modo de operação, o controle irá monitorar a abertura dos contatos do religador e realizar a tentativa de religamento baseada em parâmetros característicos de tempo e corrente (ROTH, 2012).

2.1.2 Automação da rede de distribuição

Com o avanço tecnológico e o crescimento da demanda de energia, as concessionárias de distribuição de energia foram obrigadas a investir na automação de suas redes de distribuição. Além disso, as redes elétricas inteligentes necessitam de uma estrutura básica de comunicação e monitoramento para serem implantadas, embora se saiba que os sistemas de automação existentes ainda não atendam todos os requisitos para a implantação de uma Rede Elétrica Inteligente (ROHBOGNER; FEY, 2012).

A Automação da Distribuição (AD) fornece opções para a computação em tempo real, comunicação e controle de sistemas de distribuição e, portanto, oferece oportunidades para alcançar as metas acima mencionadas. O conceito de automação de distribuição foi proposto em 1970 (IEEE-PES, 2010) e, desde então, sua evolução foi ditada pelo nível de sofisticação de monitoramento existente, controle e tecnologias de comunicação, e de desempenho e fatores econômicos

associados com o equipamento disponível. A evolução dos sistemas de controle de supervisão e aquisição de dados (SCADA), que têm sido utilizados para o monitoramento dos sistemas de geração e transmissão, também ajudou no progresso no campo da automação de distribuição. A automação da distribuição é um dos principais pilares que suporta as Redes Elétricas Inteligentes, sendo apoiada em infraestruturas de telecomunicações e de medição, considerando a aplicação de recursos diversos como: sistemas de supervisão, religadores, equipamentos micro processados, afim de, melhorar a qualidade de serviço, a eficiência operacional e a gestão de ativos.

A automação de rede de distribuição, no contexto das redes inteligentes, deve ser uma ferramenta ativa de apoio à operação, ou seja, deve-se antecipar ao operador na tomada de decisão. Atualmente, projetos têm sido desenvolvidos com funcionalidades na média tensão e, desse modo, além dos equipamentos e dispositivos que possibilitam ser automatizados, são necessários algoritmos capazes de encontrar a configuração ideal da rede, levando-se em conta as premissas definidas. Para auxiliar o operador de uma rede de distribuição há uma série de ferramentas de software que podem ser utilizadas para a tomada de decisão, com implementação em tempo real. É possível citar a análise de topologia, cálculo de fluxo de potência (*Power Flow*), gerenciamento de qualidade de energia e gerenciamento da configuração do sistema. As ferramentas podem estar disponíveis de forma *on-line* para ajudar na tomada de decisão, ou *off-line* para estudar o impacto das decisões (“*what-if*” cenários). Algumas dessas tecnologias estão atualmente disponíveis no formato *off-line*, mas todos os aplicativos citados estão em amplo desenvolvimento e podem estar disponíveis com a implantação das redes elétricas inteligentes (RUSH, 2011).

As funções de automação de distribuição em geral podem ser divididas em duas categorias principais, nomeadamente funções no nível do cliente e funções no nível do sistema. As funções no nível do cliente são as funções que requerem a instalação de algum dispositivo com capacidade de comunicação nas instalações dos clientes. Incluem controle de carga, leitura remota, taxas de tempo de uso, e ligar e desligar de forma remota. As funções no nível do sistema são aquelas que se relacionam com as operações do sistema. Os dispositivos de controle e de comunicação para essas funções são instalados em locais diferentes no sistema, normalmente nas subestações e alimentadores. Essas funções incluem detecção de

falhas e restauração do serviço, controle de volt/var, etc. Além das funções do tipo de operação do sistema, a proteção digital de subestações e alimentadores é considerada parte da automação de distribuição em algumas situações. É possível ainda que as funções na subestação e em nível de alimentador sejam realizadas de uma forma coordenada. Por exemplo, a comutação de banco de capacitores nos alimentadores pode ser coordenada com a comutação de banco de capacitores na subestação (IEEE-PES, 2010).

Para implantação de redes inteligentes no Brasil, o programa de implantação de redes elétricas inteligentes identifica algumas funcionalidades, descreve as funções esperadas e as relações entre os componentes necessários para execução de cada funcionalidade. No âmbito da automação da distribuição foram identificados três tipos de componentes (KAGAN *et al.*, 2013):

1. Equipamentos, que são componentes que operam, usualmente, sob a tensão próxima da nominal do sistema de distribuição e pelo qual transitam altas correntes, são estruturas de potência. Estão nesta categoria os transformadores, linhas, disjuntores, chaves, religadores, banco de capacitores e banco de reguladores.
2. Dispositivos, que são componentes de função de monitoramento e comando associados aos equipamentos. São estruturas de controle e normalmente operam com softwares aplicativos fechados específicos de cada fabricante. Estão nesta categoria os dispositivos de proteção, os IEDs (Dispositivos eletrônicos inteligentes), os dispositivos de medição, os transdutores analógico-digitais, os transmissores e receptores de dados e as unidades de aquisição de dados.
3. Sistema de Tecnologia da Informação, que são softwares que contribuem para o monitoramento, o comando e o controle dos equipamentos. Há sistemas corporativos como *GIS* (Sistema de Informações Geográficas), *ERP* (Sistemas de Gestão Empresarial) e há sistemas Técnicos como *SCADA* (Sistema de Aquisição de Dados), *EMS* (Sistema de gerenciamento de Energia), *DMS* (Sistema de Gerenciamento da Distribuição), *OMS* (Sistema de Gerenciamento de Ocorrências).

Estas ferramentas se aplicam ao segmento de automação que são: Subestação de Distribuição (SED), Sistemas de Distribuição de Média Tensão (SDMT) e Sistemas de Distribuição de Baixa Tensão (SDBT).

2.2 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Existem várias definições para o conceito de Redes Elétricas Inteligentes (REI), a maioria se refere à aplicação intensa de tecnologias de informação e comunicação nos sistemas elétricos de potência. As Redes Elétricas Inteligentes têm o propósito de proporcionar conectividade, automação e coordenação de diversos fornecedores, consumidores e operadores de redes de comunicação, atuando em diversos seguimentos e tarefas.

O termo Redes Elétricas Inteligentes é a tradução do termo em inglês *smart grid*, conceito mundialmente utilizado para definir a utilização de equipamentos inteligentes na rede elétrica. Sua definição pode ser descrita de várias maneiras. Em S. Massoud Amin; Wollenberg (2005) o termo surgiu pela primeira vez como um novo conceito de automação do sistema elétrico.

As redes elétricas atuais, mesmo que automatizadas, não são consideradas inteligentes devido ao fato de que, apesar de possuírem tecnologias de informação e comunicação abrangentes (TIC) – como o controle de supervisão e aquisição de dados (SCADA) – não são capazes de cumprir totalmente os novos requisitos de um sistema *smart grid*, tais como comunicação bidirecional (utilizada, por exemplo, em medidores inteligentes), novos modelos de distribuição de energia (por exemplo, microrredes ou redes de veículos elétricos), ou a gestão rigorosa de dados em tempo real (ESPINOZA *et al.*, 2013).

Um modelo de referência conceitual sobre redes inteligentes é apresentado na Figura 2.1. O modelo identifica sete domínios no âmbito de Redes Elétricas Inteligentes como a geração de energia em massa, transmissão, distribuição, mercados de energia, operações, prestadores de serviços, clientes e os principais atores e suas aplicações dentro de cada domínio. O modelo de referência também identifica interfaces entre domínios e atores e aplicações sobre os quais informações devem ser trocadas e para os quais são necessários padrões de interoperabilidade (NIST *et al.*, 2010).

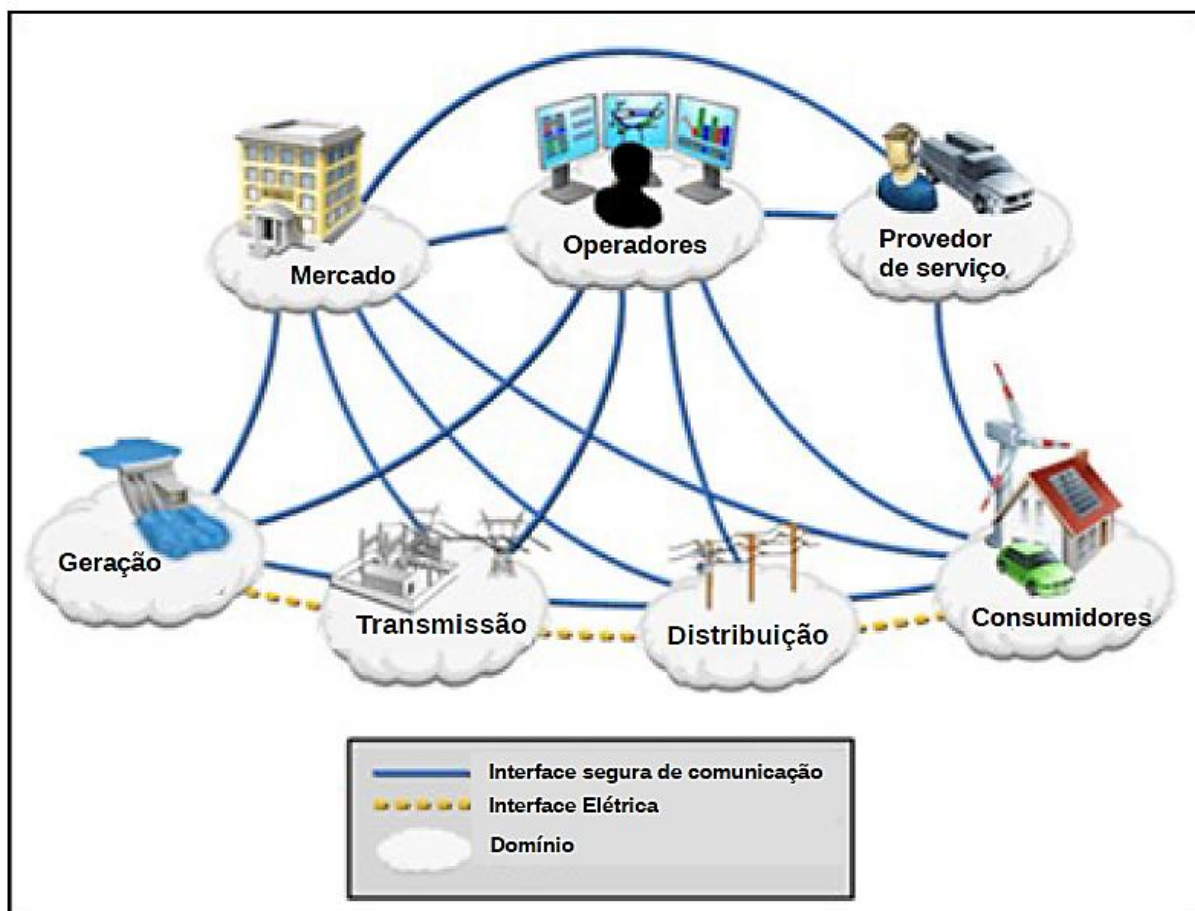


Figura 2.1 – Modelo Conceitual *Smart Grid*

Fonte: Adaptado de NIST (2010)

O modelo conceitual apresentado fornece de forma abrangente a perspectiva de alguns grandes relacionamentos no domínio de Redes Elétricas Inteligentes que estão em desenvolvimento. Além de ser uma ferramenta que identifica atores e possíveis caminhos de comunicações em Redes Elétricas Inteligentes, é também uma maneira para identificar potenciais e interações, bem como as aplicações potenciais e as capacidades habilitadas por essas interações. Do ponto de vista de comunicação, cada sistema pode desempenhar qualquer papel, de fornecedor ou consumidor de informações, ou de ambos. Em adição a essa comunicação, esses sistemas são constituídos por subsistemas com comunicações internas específicas, um desses são os sistemas de domínio da distribuição de energia (IEC-SG3, 2010).

De acordo com o conselho de padronização e gerenciamento (SMB) da *International Electrotechnical Commission (IEC)*, em uma rede inteligente, o fluxo de energia muda a partir de um padrão unidirecional (ou seja, de geração centralizada

utilizando linhas transmissão e redes de distribuição para os clientes) para um fluxo bidirecional, para atender os requisitos de geração distribuída (principalmente a partir de fontes renováveis) e veículos elétricos (ESPINOZA *et al.*, 2013).

No entanto, as grandes mudanças no âmbito de redes elétricas inteligentes devem ocorrer na distribuição e nos pequenos consumidores, pois as grandes plantas de geração e de transmissão já possuem em grande parte a automatização disponível, isso como requisito para estabilidade do sistema. O impacto nos níveis mais altos do sistema elétrico ocorre de forma indireta, por meio do achatamento da curva de carga e das consequências do surgimento de uma quantidade significativa de geração distribuída (MME, 2012).

A modernização das redes de distribuição de energia elétrica vem ocorrendo em diversos países desde a década de 1980, especialmente com a troca de medidores eletromecânicos por eletrônicos. Essa é uma condição necessária, mas não suficiente para o conceito de medição inteligente. Um dos fatores chave para implantação das Redes Elétricas Inteligente são as infraestruturas de medição avançadas (*Advanced Metering Infrastructure* – AMI). Esta tecnologia de mediação avançada é capaz de agregar mais funcionalidades à medição do que os sistemas atuais de leitura automática de medidores. Refere-se a um sistema que compreende medidores digitais com capacidade de processamento, armazenamento e comunicação com infraestrutura bidirecional entre os medidores e a concessionária de energia elétrica. Isso possibilita a implantação de novas funções como: corte e religamento remoto, reconfiguração de parâmetros, leitura de demanda, integração com sistemas de automação de rede, entre outras (YAN *et al.*, 2013) (CGEE, 2012). Além disso, um sistema AMI possui ainda a capacidade de permitir às distribuidoras enviarem preços para os clientes em sinal de alerta para períodos críticos de horário de ponta.

Essa comunicação direta com os clientes deve incentivar a economia durante os períodos de pico e permitir que a concessionária implemente o controle direto da gestão da demanda. Com preços enviados em tempo real, os consumidores podem gerenciar o uso de energia de forma mais eficiente. Os preços da energia poderiam ser retransmitidos diretamente para aparelhos domésticos ou através de um gateway de gerenciamento de energia localizado na residência do cliente (BOUHAFS; MACKAY; MERABTI, 2012).

A realização do conceito de Redes Elétricas Inteligentes deve produzir uma convergência entre as infraestruturas de geração, transmissão e distribuição de energia, assim como a infraestrutura de comunicações digitais e processamento de dados. A infraestrutura de telecomunicações interliga os chamados *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) e medidores inteligentes, trocando informações e ações de controle entre os diversos segmentos da rede elétrica.

Dessa forma, a rede de distribuição e a integração de geração nesse nível devem ser os grandes responsáveis pelas mudanças no sistema elétrico de potência, bem como a criação de diversos serviços como: gerenciamento de energia em edificações, gerenciamento de faturas de energia, instalação e manutenção de equipamentos de geração e comunicação, conforme ilustrada na Figura 2.2.

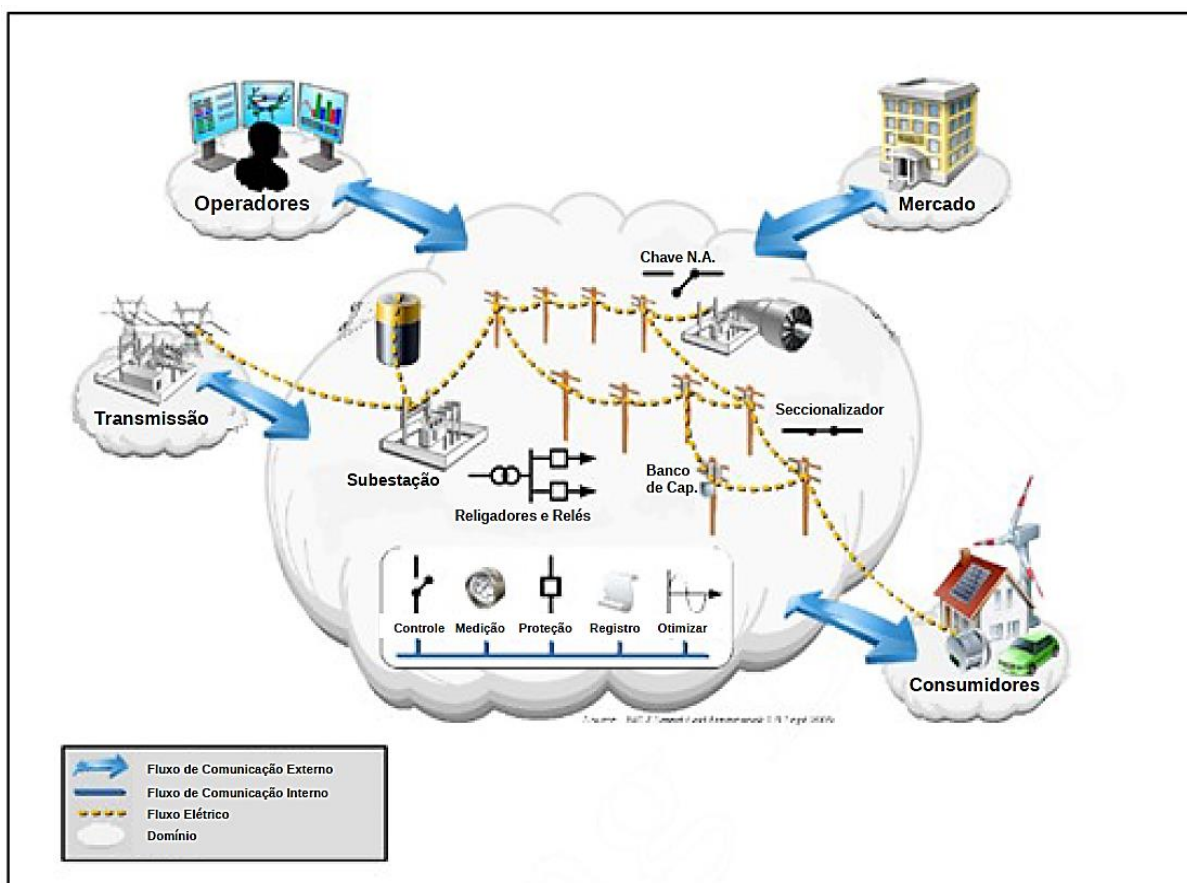


Figura 2.2 – Modelo Conceitual de *Smart Grid*, domínio distribuição
Fonte: Adaptado de NIST (2010)

Em IEA (2011) são apresentadas algumas características atribuídas às Redes elétricas Inteligentes:

- Autorrecuperação: capacidade de automaticamente detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede;
- Participação proativa dos consumidores: habilidade de incluir os equipamentos e comportamento dos consumidores nos processos de planejamento e operação da rede;
- Capacidade de resistir a ataques externos: capacidade de mitigar e resistir a ataques físicos e cyber-ataques;
- Qualidade de energia: prover energia com a qualidade exigida pela sociedade digital;
- Capacidade para acomodar uma grande variedade de fontes e demandas: capacidade de integrar de forma transparente uma variedade de fontes de energia de várias dimensões e tecnologias;
- Menor impacto ambiental do sistema produtor de eletricidade, reduzindo perdas e utilizando fontes renováveis e de baixo impacto ambiental;
- Resposta da demanda mediante a atuação remota em dispositivos dos consumidores;
- Viabiliza e beneficia-se de mercados competitivos de energia, favorecendo o mercado varejista e a microgeração.

Em diversos locais do mundo, os sistemas elétricos de potência estão passando por profundas mudanças por diversos motivos. Existe a necessidade de se atender a demandas ambientais e de conservação de energia por meio de uma rede mais confiável que precisa aumentar sua eficiência operacional e melhorar a qualidade para o consumidor. As redes de distribuição de energia elétrica, em que as operações ainda são manuais, juntamente com componentes eletromecânicos obsoletos, precisarão se transformar em uma Rede Elétrica Inteligente.

A modernização da rede elétrica possibilitará vários benefícios ao sistema elétrico e ao consumidor. Dentre os benefícios, está a automação do sistema de distribuição e, conseqüentemente o monitoramento dos equipamentos na rede de distribuição que permite conhecer o seu estado, permitindo melhorar a sua funcionalidade (ROHBOGNER; FEY, 2012). Algumas destas funcionalidades

ilustradas na Figura 2.3 são destacadas por Brown, (2008), como a autorrecuperação de redes de distribuição, alta confiabilidade e qualidade de energia, resistência a ataques cibernéticos, aperfeiçoamento da utilização de ativos, minimização do custo operacional e manutenção e instalação de equipamentos para armazenamento de energia.

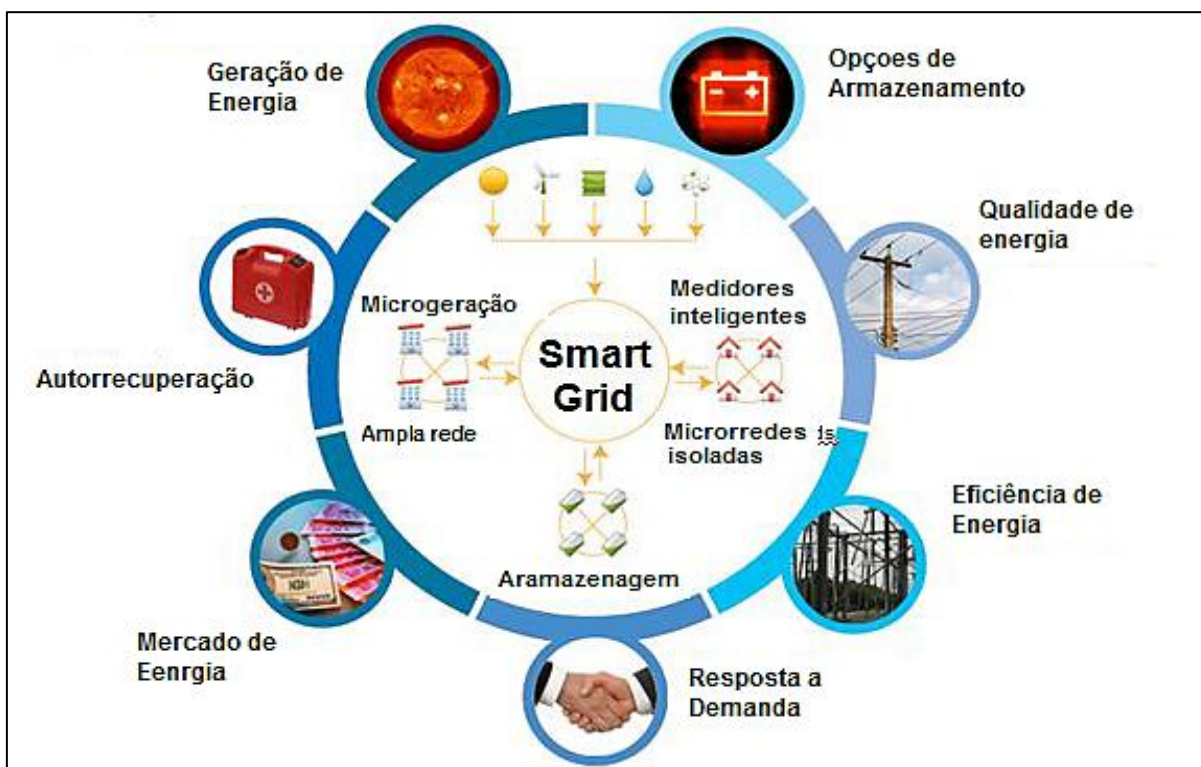


Figura 2.3 – Benefícios de uma Rede Elétrica Inteligente
Fonte: Adaptado de Brown (2008)

De acordo com o relatório do Departamento de Iniciativa de Rede Moderna de Energia dos Estados Unidos, uma Rede Elétrica Inteligente deve fornecer os seguintes quesitos: a autorrecuperação do sistema elétrico; a participação efetiva do consumidor; prover qualidade de continuidade de energia; possuir suporte para diferentes tipos de armazenamento e geração de energia; ter maior eficiência no sistema (HAN; XU, 2011). Existem muitas formas de incorporar inteligência a um sistema de distribuição de energia elétrica. Isso pode ser feito através de investimentos em infraestrutura de comunicações, incluindo recursos distribuídos de energia, implementação de sistemas de resposta à demanda, implantação de sensores na rede elétrica e estabelecer locais que sejam capazes de operar em isolamento planejado (BROWN; SURYANARAYANAN, 2009). Muitas tecnologias

adotadas em Redes Elétricas Inteligentes normalmente já foram utilizadas em outras aplicações industriais, tais como redes de sensores e redes sem fio de telecomunicações, e estão sendo adaptadas para o uso em um novo paradigma de inteligência e sistema interligado. Em geral, as tecnologias de comunicação para Redes Elétricas Inteligentes podem ser agrupadas em cinco áreas importantes como a de componentes e equipamentos avançados, sensoriamento e medição, suporte a tomada de decisões, normas e grupos, e comunicações integradas (YAN *et al.*, 2013).

No trabalho de Brown e Suryanarayanan (2009), é apresentada uma definição de sistema de distribuição inteligente – *smart distribution system* –, que, do ponto de vista da indústria, tem como objetivo estudar os impactos das redes elétricas inteligentes na engenharia de distribuição. Algumas técnicas e ferramentas descritas em Brown; Suryanarayanan (2009) formam um conjunto de oito filosofias de Redes Elétricas Inteligentes. Essas foram apresentadas em EISA (2007). As filosofias descritas são os recursos distribuídos de energia e reparação do pico da demanda, resposta à demanda, autorrecuperação, sensoriamento, dispositivos para o consumidor, otimizar ativos distribuídos, ilhamento, e ferramentas avançada como mostrado na Figura 3.2.

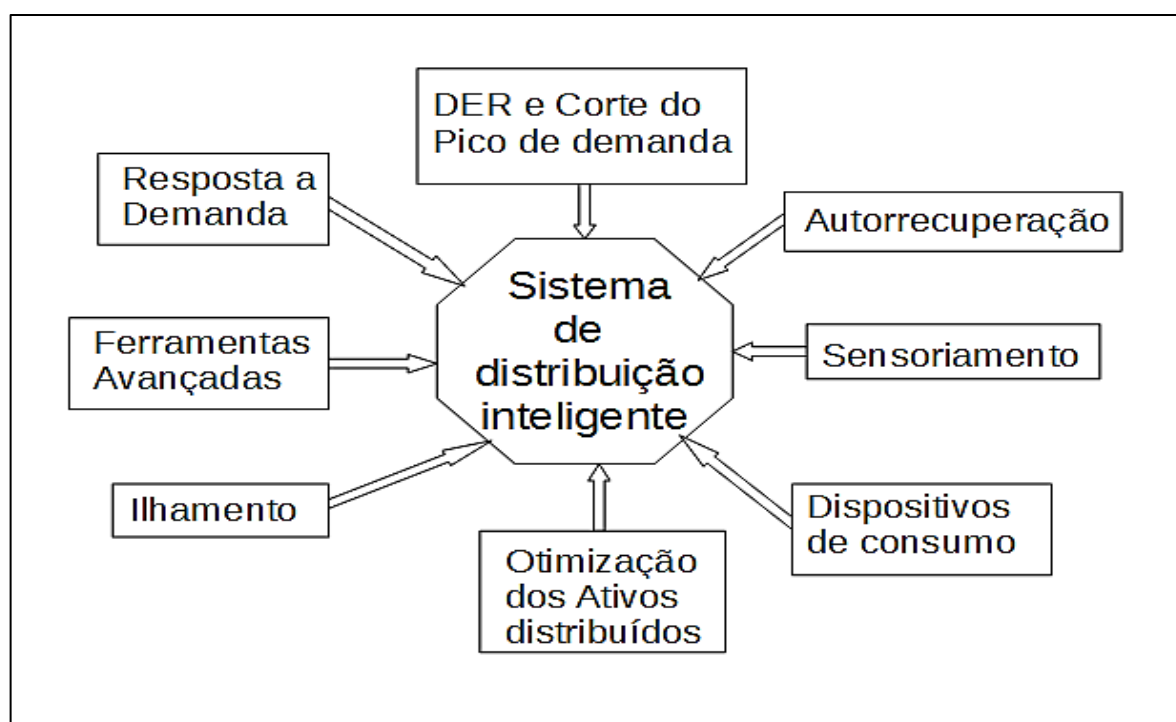


Figura 2.4 – Oito filosofias de Redes Elétricas Inteligentes
Fonte: Adaptada de EISA (2007)

Muitos países têm se dedicado a estudos sobre essa tecnologia com investimento de volumosos recursos, e alguns já iniciaram a instalação dessas redes, com destaque para Itália, Estados Unidos, Japão e alguns outros países europeus. Nesse contexto, foi criado no Brasil pela Portaria Nº 440, de 15 de abril de 2010, um Grupo de Trabalho – GT – com o objetivo de analisar e identificar ações necessárias para subsidiar o estabelecimento de políticas públicas para a implantação do Programa Brasileiro de Redes Elétricas Inteligentes – *Smart Grid*.

Com o Programa Brasileiro de Redes Elétricas Inteligentes, iniciou-se um projeto estratégico para um programa de P&D regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com o objetivo de atender demandas de grande relevância do setor. Foram criados blocos de pesquisa para atender a essas demandas, que são de grande complexidade científica e tecnológica. O foco do programa converge para melhoria da qualidade, interatividade, operação eficiente e segura, novas oportunidades de negócios e na sustentabilidade.

A implantação dos projetos de Redes Elétricas Inteligentes requer a partição de órgãos nacionais regulamentadores e adequação da legislação, de regulamentos e normas. A responsabilidade para regulamentação necessária para implantação das Redes Elétricas Inteligentes é da ANEEL, enquanto que as normas contendo as especificações e métodos de ensaios para equipamentos e medidores eletrônicos inteligentes são responsabilidade da ABNT e a certificação de medidores eletrônicos e inversores deverá demandar a certificação do INMETRO (KAGAN *et al.*, 2013).

Nos EUA, o principal objetivo em implantar REIs consiste em abordar o envelhecimento de suas redes, melhorar a qualidade de serviço, gerar empregos e fomento da indústria e aumentar a interação com o usuário. O foco principal na Europa é promover o uso de energias renováveis e diminuir a dependência de combustíveis fósseis para uma maior segurança energética.

No caso do Brasil, os objetivos englobam tanto os motivos americanos quanto os europeus sob o ponto de vista das concessionárias, dos consumidores e do agente regulador, com destaque para (CGEE, 2012):

- Reduzir as perdas técnicas e comerciais;
- Melhorar a qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras;
- Reduzir os custos operacionais;
- Melhorar o planejamento da expansão da rede;

- Melhorar a gestão dos ativos;
- Promover a eficiência energética;
- Fomentar a inovação e a indústria tecnológica.

O Projeto de pesquisa programa de P&D regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi estruturado em sete blocos de pesquisa: BP1 – Governança e Integração do Projeto; BP2 – Medição Inteligente; BP3 – Automação da Distribuição e da Transmissão; BP4 – Geração Distribuída; Armazenamento e Veículos Elétricos; BP5 – TI e Telecom; BP6 – Políticas Públicas e Regulação; BP7 – Perspectiva do Consumidor. Os Blocos de Pesquisa dois, três e quatro trataram das tendências e opções tecnológicas e dos seus impactos no modelo de negócio da distribuição de energia elétrica. O Bloco cinco tratou dos requisitos de telecomunicações e tecnologia da informação necessários para suportar as necessidades geradas pelos sistemas de medição, automação e integração de geração distribuída, armazenamento de energia e veículos elétricos plugáveis. O Bloco seis abordou as questões das políticas públicas e da regulação necessárias para a viabilização da migração tecnológica das redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica no Brasil. O Bloco sete abordou a perspectiva do consumidor frente às mudanças que poderão ser proporcionadas pelas Redes Elétricas Inteligentes (KAGAN *et al.*, 2013). A convergência das metodologias desenvolvidas de cada bloco de pesquisa, o modelo de integração dos blocos está ilustrado na Figura 2.5.

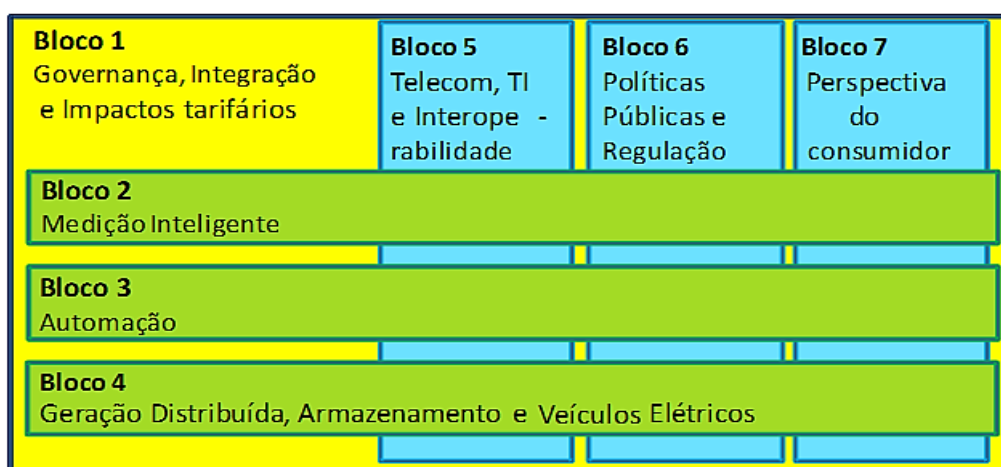


Figura 2.5 – Convergência das tecnologias aplicadas
Fonte: Adaptada de KAGAN *et al.* (2013)

Assim, é possível concluir que a rede de distribuição inteligente se torna mais robusta e flexível do que a rede de distribuição tradicional (DONGLI *et al.*, 2011).

A implantação de uma Rede Elétrica Inteligente é feita de forma gradual, no entanto, sabe-se que para tal, a infraestrutura e as tecnologias de telecomunicações são fundamentais. Os serviços de telecomunicação são um grande gargalo para que as Redes Elétricas Inteligentes se tornem realidade. Os blocos do Projeto estratégico (REI) convergem para o mesmo ponto, que são as telecomunicações, conforme ilustra a Figura 2.6, dada a importância deste segmento na iteração dos blocos. Para a dinâmica de uma Rede Elétrica Inteligente serão necessárias tecnologias de comunicação de alta velocidade, totalmente integradas, com vias bidirecionais para as trocas de informações em tempo real. Isto com uma arquitetura aberta, na forma de um ambiente *plug-and-play*, segura para componentes, clientes e operadores, permitindo-lhes falar, ouvir e interagir. Muitas das tecnologias necessárias estão disponíveis hoje, enquanto outras estão em vários estágios de desenvolvimento e espera-se que irão contribuir para a modernização da rede até o final desta década (CGEE, 2012).

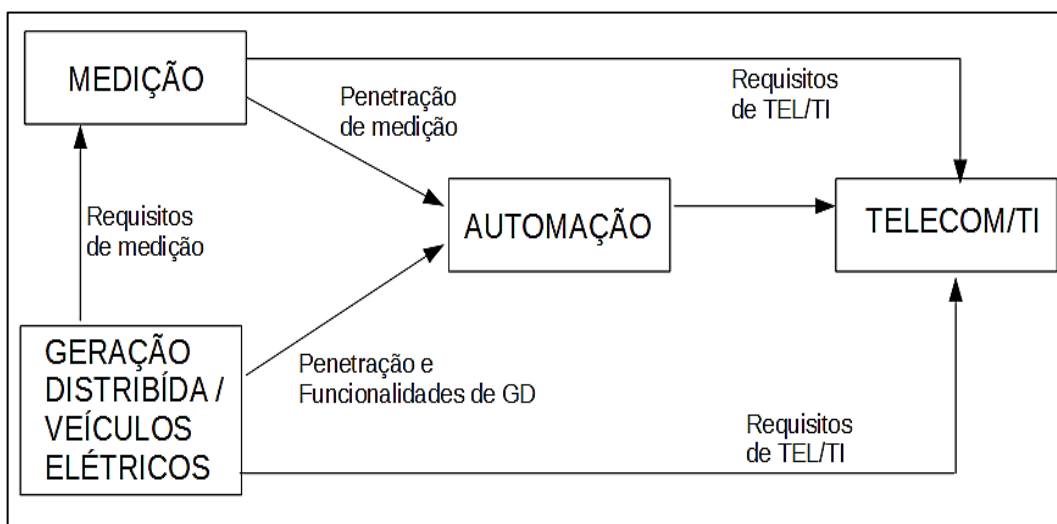


Figura 2.6 – Integração dos blocos de pesquisa
Fonte: Adaptada de KAGAN *et al.* (2013)

A automação da distribuição avançada processa informações em tempo real a partir de sensores e medidores para localização de falhas, reconfiguração automática de alimentadores, controle de tensão e otimização da potência reativa, ou para controlar a geração distribuída. Tecnologias de sensores podem permitir a

manutenção e condicionamento com base no desempenho de componentes de rede, otimizando o desempenho do equipamento e, portanto, a utilização eficaz dos recursos (IEA, 2011).

A implantação das REI justifica-se pela complexidade física e institucional das redes elétricas no mundo, tendo o Estado um papel central como organizador e impulsionador da modernização das redes elétricas. Para isso, reforça-se a necessidade de articulação entre governo, indústria, concessionárias distribuidoras, institutos de pesquisa e academia em torno de um plano nacional de REI, tal como já foi realizado em outros países. Além de estimular e organizar temporalmente a migração em massa para as REI, esse plano deve considerar o tratamento de aspectos regulatórios e tecnológicas (padronização, interoperabilidade, etc.) e a receptividade do consumidor, além de prever a forma de remuneração dos investimentos a serem realizados e alternativas de financiamento.

No Brasil, além dos tecnológicos, os maiores problemas ainda são aspectos regulatórios e incentivos do governo para impulsionar a modernização no país.

2.3 AUTORRECUPERAÇÃO

As redes de distribuição inteligentes se diferenciam das redes de distribuição convencionais por possuírem alta confiabilidade, sistema de autorrecuperação, autossuficiência e outras características interativas no sistema. A autorrecuperação ou FLISR (*Fault Location Isolation and System Restoration*) é um conceito importante em sistemas de distribuição inteligentes, que trata de algoritmos para a tomada de medidas preventivas e de como tratar os problemas ocorridos no sistema.

A definição de autorrecuperação se refere à capacidade da rede de, frente a um distúrbio, saber como identificar e isolar o problema, reduzir ao máximo o número de clientes afetados e reconfigurar em menor tempo possível – visando a eliminação de sobrecargas –, da violação de tensão e minimização de perdas no sistema. Outra característica importante de um sistema de autorrecuperação é a capacidade de transferir cargas das áreas que sofrem violação de restrições para

outros alimentadores vizinhos sem violar as restrições operacionais dos mesmos (AREFIFAR; MOHAMED; EL-FOULY, 2013)

A autorrecuperação é umas das funcionalidades do conceito de Redes Elétricas Inteligentes, sendo um algoritmo desenvolvido para atuar na rede de distribuição em situações de contingência, ou seja, em situações anormais e indesejadas, podendo ser uma falta na rede de distribuição. Esta situação, mesmo em redes de distribuição automatizadas, necessita do auxílio de um operador para realizar a recuperação das cargas após uma falta na rede. Neste caso, por se tratar de uma situação de contingência, a transferência efetuada pela função de autorrecuperação é temporária, até que o defeito seja resolvido e assim, os alimentadores podem voltar à sua configuração original.

O processo de autorrecuperação pode ser realizado em duas etapas desde o momento em ocorre o defeito na rede de distribuição, sendo a primeira etapa a identificação e o isolamento automático do defeito. A identificação do defeito deve ocorrer de forma automática e consiste em identificar o bloco de carga onde o defeito ocorreu, somente com o auxílio das informações oriundas dos dispositivos de proteção e manobra instalados ao longo da rede de distribuição, sendo estes dispositivos as chaves automatizadas e religadores automáticos. A segunda etapa seria a execução da funcionalidade de autorrecuperação, que compreende recompor o fornecimento de energia aos demais blocos de carga através da manobra de chaves de interligação do circuito em questão a um circuito adjacente.

Existem duas abordagens para desenvolvimento de um sistema de autorrecuperação. A primeira seria a inteligência da funcionalidade distribuída ou descentralizada e a segunda a inteligência centralizada. O automatismo com a inteligência descentralizada, exige uma interação sintonizada dos diversos dispositivos de manobra instalados na rede de distribuição, utilizando lógicas implementadas nos próprios IEDs. Para isso, faz-se necessário uma infraestrutura de telecomunicações bem estruturada para troca de informações entre os equipamentos. A centralizada tem as mesmas funcionalidades da descentralizada, porém toda a lógica de inteligência é centralizada, podendo ser em um centro de operações. Havendo necessidade de ser implementada nos sistemas de TI (corporativos), é importante observar os requisitos de infraestrutura de comunicação para troca de informações, como dispositivos que estão instalados na rede de distribuição e de segurança da informação. Nesse tipo de implementação, o sistema

ainda pode contar com as informações de medidores eletrônicos instalados em clientes, e também sensores denominados localizadores de falta instalados ao longo da rede de distribuição (KAGAN *et al.*, 2013).

A metodologia de restauração nas redes convencionais normalmente tem sido realizada de forma heurística, por sequencias de operações realizadas de forma manual para resolução do problema. Em uma rede de distribuição, no contexto de Redes elétricas Inteligentes, com a automação da restauração e o uso de IEDs atualizando sistema de inteligência artificial, os benefícios seriam: uma rápida restauração, mais cargas restauradas e menor necessidade de envio de técnicos a campo para solucionar os problemas (OUALMAKRAN *et al.*, 2012).

Os grandes desafios estão, além da implantação do sistema, no controle e monitoramento em tempo real do seu funcionamento na rede de distribuição, previsão do estado da rede após uma detecção, realização de diagnósticos rápidos e eliminação de defeitos ocorridos na rede de forma ágil, sem intervenção humana.

Em uma rede de distribuição, devido a sua complexidade, é importante que as soluções para resolver o problema devam ser diferenciadas de um sistema de automação que vão além de lógicas clássicas. Recentemente, soluções estudadas para resolver esse problema têm sido baseadas na utilização de técnicas de inteligência artificial, pois as ações obtidas para resolução do problema podem ser muito próximas a de um ser humano.

Um sistema de autorrecuperação com nenhuma intervenção humana ou intervenção parcial é a principal forma de resolver o problema de restauração da rede de distribuição, pelo fato de realizar o monitoramento da rede, verificar o estado em tempo real da rede de distribuição e por apresentar um diagnóstico rápido e eliminar as faltas da rede. Dessa forma, um sistema de autorrecuperação em uma rede de distribuição inteligente terá uma maior confiabilidade e qualidade de energia quando se trata de continuidade de serviço.

Um sistema de tecnologia de controle para autorrecuperação no contexto Redes Elétricas Inteligentes pode ser dividido em três níveis, a saber: o nível da camada de base, o nível da camada de suporte e a camada de aplicação. A camada de base compreende, na rede de energia elétrica e seus equipamentos, incluindo a rede física, switches inteligentes, terminais de distribuição inteligente de energia, proteção e controle de equipamentos, geração distribuída e microrrede. A camada de suporte é composta por toda a infraestrutura de comunicação e dados, que

consistem em alta velocidade de comunicação de dados nos dois sentidos em tempo real, tecnologia de comunicação integrada, arquitetura de comunicação aberta, um sistema unificado de normas técnicas e medidas de segurança em comunicação tratada de forma abrangente. E na camada de aplicação, são várias funcionalidades de autorrecuperação que usam de técnicas dependentes do acompanhamento, avaliação, controle e recuperação, para alcançar a auto prevenção e a autorrecuperação da rede de energia elétrica da melhor forma, com base nos equipamentos de comunicação de dados e equipamentos elétricos (DONGLI *et al.*, 2011).

Em Amin (2001) é apresentada a necessidade de uma infraestrutura de telecomunicações e de automação que possa dar subsídio para novas ferramentas e técnicas para implementar sistemas de autorrecuperação em sistemas de energia elétrica. Uma arquitetura baseada em sistema Multiagente é apresentada como solução da resolução do problema de autorrecuperação. O sistema é dividido em três camadas utilizando dois tipos de agentes, os reativos e os cognitivos. Sendo que a segunda camada consiste os agentes cognitivos que têm metas e planos explícitos que lhes permitem alcançar seus objetivos. Os objetivos dos agentes nesta camada são confiabilidade, robustez e autorrecuperação do sistema elétrico.

O problema de autorrecuperação devido a muitas combinações de operações de comutação que aumentam com a crescente complexidade do sistema é um problema de ordem combinatória (SCHULZ, 2007). Com a utilização de um sistema Multiagente para um sistema de autorrecuperação, do ponto de vista de controle e monitoramento, o sistema pode ser classificado como centralizado, descentralizado ou híbrido. Em uma abordagem descentralizada do sistema de controle de autorrecuperação não existe centro de controle, cada entidade ou agente no sistema funciona de forma independente, como o exemplo de sistemas baseados em agentes. Em um sistema centralizado do processo de autorrecuperação, um ou mais centros de controle podem ser utilizados para tomada de decisões da autorrecuperação.

2.4 TECNOLOGIAS DE AGENTES DE SOFTWARE E SISTEMAS MULTIAGENTE

Os sistemas multiagente (MAS) surgem como uma área de pesquisa da Inteligência Artificial que assume que a inteligência de um sistema deve ser definida em um nível de componente, sendo assim distribuída.

2.4.1 Inteligência Artificial distribuída

Em meados de 1970, a Inteligência Artificial Distribuída (IAD) evoluiu e se diversificou rapidamente, tornando-se um campo de pesquisa bem estabelecido e promissor, que concentra ideias de algumas áreas, como:

- Inteligência Artificial;
- Ciências da Computação;
- Sociologia;
- Economia;
- Ciência da Organização e Gerência;
- Filosofia;

A IAD estuda técnicas e mecanismos, com o objetivo de resolver problemas, em um ambiente composto por várias entidades que colaboram entre si. A importância dessa área está no fato de que muitos problemas possuem essa configuração distribuída, havendo necessidade da existência de entidades que, interagindo entre si trocando informações, encontrem a solução global do problema.

A Inteligência Artificial Distribuída não está preocupada com arquiteturas de computadores paralelos, linguagens de programação paralela ou sistemas operativos distribuídos. A IAD está preocupada essencialmente com a resolução de problemas onde diversos agentes resolvem subproblemas e se comunicam numa linguagem de alto-nível (FERNANDES, 2003).

Em Saraiva (2012), é apresentado que um sistema de inteligência artificial distribuída possui características similares às características de um sistema de *smart grids*, devido a diversas funcionalidades aplicadas exigidas pelo sistema para atingir um único objetivo, podendo ser a autorrecuperação do sistema, a redução de perdas elétricas, outros. A vantagem de se utilizar um sistema baseado em multiagentes para resolver o problema de autorrecuperação é a flexibilidade e capacidade de expandir o sistema, pois esse método considera um sistema de agentes flexíveis que responde de forma correta a situações dinâmicas, podendo ser expandido facilmente acrescentando agentes. A investigação em sistemas multiagentes está focada no desenvolvimento de princípios e modelos computacionais para construir, descrever, implementar e analisar as formas de interação e coordenação de agentes em sociedades de reduzida ou elevada dimensão (LESSER, 1999). A tecnologia baseada em multiagentes se encontra inserida no contexto de inteligência artificial (IA), mais precisamente no contexto de inteligência artificial distribuída (IAD).

A Inteligência Artificial Distribuída está preocupada essencialmente com quatro assuntos:

- Divisão dos agentes;
- Heterogeneidade dos agentes;
- Métodos para a distribuição de controle (entre os agentes);
- Possibilidades de comunicação entre os agentes.

A área de pesquisa de IAD é dividida em dois campos principais: Resolução Distribuída de Problemas (RDP) e Sistema Multiagente (SMA) (JENNINGS *et al.*, 1998). A resolução distribuída de problema considera como um problema particular pode ser resolvido por uma série de módulos (nós), que cooperam dividindo e compartilhando conhecimento sobre o problema e suas soluções continuamente. Dessa forma, os agentes são distribuídos em unidades colaborativas responsáveis pela resolução de tarefas específicas (NAREYEK, 2000).

Ao contrário da RDP, os Sistemas Multiagente têm um foco na estruturação do agente e não na estruturação do problema, o que permite uma flexibilidade para os agentes que são capazes de resolver mais de um problema. Um sistema Multiagente pode ser definido como uma rede de agentes solucionadores de problemas que trabalham em conjunto para resolver os problemas que estão além das capacidades individuais e conhecimentos de cada solucionador de problemas.

Para resolução dos problemas as características de um sistema Multiagente são (JENNINGS *et al.*,1998): (i) Cada agente possui informações incompletas, ou incapacidade para resolver o problema, assim, cada agente tem um ponto de vista limitado; (ii) Não possui um controle do sistema global; (iii) Os dados são descentralizados; e (iv) Computação é assíncrona.

Algumas das razões para o crescente interesse nas pesquisas MAS incluem: a capacidade de fornecer robustez e eficiência; a capacidade de permitir interoperabilidade do legado de sistemas existentes; e a capacidade de resolver problemas em que os dados, ou o controle, são distribuídos (JENNINGS *et al.*, 1998).

Os sistemas multiagente são a melhor maneira de caracterizar os sistemas de computação distribuída. Sendo assim, as características de um ambiente para execução de um sistema Multiagente podem ser ambientes que forneçam uma infraestrutura que especifica os protocolos de comunicação e interação; ambientes que sejam tipicamente abertos e sem nenhum designer centralizado; ambientes que contenham agentes que sejam autônomos e distribuídos; e que sejam seres pró ativos ou cooperativos (WEISS,1999).

O campo do Sistema Multiagente estuda essencialmente os agentes normalmente heterogêneos que se agrupam em comunidades sem controle centralizado e que comunicam utilizando uma linguagem de alto-nível. Esse campo, nos últimos anos, está sendo claramente responsável pela maioria da investigação científica realizada no âmbito da IAD (REIS, 2003).

2.4.2 Agentes

O termo agente é utilizado na literatura computacional para determinar diversos tipos de programas. Estes programas não necessariamente são apresentados com comportamento inteligente. Existem várias definições para o termo agente, com vários pontos de vista, mesmo na área de IA. Os agentes podem ser um software ou um sistema de computador que está situado em algum ambiente e que é capaz de ação autônoma neste ambiente, a fim de atingir seus objetivos de projeto (WEISS,1999). Entretanto, a interação entre vários agentes deve permitir a

conclusão de tarefas complexas, as quais não podem ser executadas por um único agente devido à visão parcial do problema que um agente possui. Segundo (RUSSELL; NORVIG, 2003), um agente de software é uma entidade capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores e de agir sobre esse ambiente por intermédio de atuadores.

Existem várias arquiteturas de agentes, que vão desde agentes reativos, operando na forma de estímulo-resposta, a agentes deliberativos que são caracterizados pelo seu raciocínio pró ativo e comportamento orientado aos objetivos. Um tipo de agente deliberativo e cognitivo bem conhecido é o que possui uma arquitetura de crença-desejo-intenção (BDI). Nos agentes BDI, a tomada de decisão depende da manipulação de crenças, desejos e intenções dos agentes, isso faz parte de uma teoria do raciocínio prático humano (WOOLDRIDGE, 2002). O desenvolvimento de agentes reativos é mais simples do que os agentes cognitivos, de fácil compreensão e mais robustos que os outros tipos de agentes tolerantes a falhas. No entanto, os agentes reativos são incapazes de prever o que vai acontecer e, assim, de antecipar o futuro, planejando as medidas a tomar (LEITÃO, 2009).

Agentes podem exibir quatro propriedades fundamentais: (i) autonomia, quando eles operam sem intervenção humana, (ii) sociabilidade, quando eles interagem com outros agentes, (iii) reatividade, quando eles percebem e reagem ao seu meio ambiente e (iv) pró-atividade, quando apresentam comportamento orientado a objetivos de intenções.

Em Jennings e Bussmann (2003), os autores acrescentam que os agentes são entidades de resolução de problemas com limites e interfaces bem definidas, possuem controle parcial e observabilidade sobre seu ambiente, têm controle sobre seu estado interno e seu próprio comportamento e são capazes de propor soluções de problemas de comportamento na busca de seus objetivos de projeto. Um sistema de software composto de agentes é referido como um sistema multiagente ou sistema à base de agente. Tais sistemas têm sido identificados como sendo adequados para o controle de sistemas complexos que são constituídos por um grande número de peças que interagem e operam em ambientes dinâmicos (JENNINGS; BUSSMANN, 2003).

2.4.3 Sistemas Multiagente

Os sistemas multiagente (SMA) são sistemas compostos por um conjunto de agentes que representam os objetivos de um sistema que possuem capacidade de interagir entre si, a fim de alcançar seus objetivos individuais, quando eles não têm conhecimentos suficientes e habilidades para alcançar individualmente os seus objetivos (WOOLDRIDGE, 2002). São conhecidos também como agentes inteligentes, sendo esses agentes possuidores de autonomia que permite ao mesmo ser capaz de agir sem a intervenção direta de seres humanos ou de outros agentes, devendo ter o controle sobre suas próprias ações e estado interno (JENNINGS *et al.*, 1998).

Agentes inteligentes podem ainda ser classificados de acordo com a maneira com que eles coletam informações e agem no ambiente, conforme ilustrado na Figura 2.7. Nesse caso, observam-se vários agentes cooperando ou disputando entre si, inseridos em um mesmo ambiente e trocando informações.

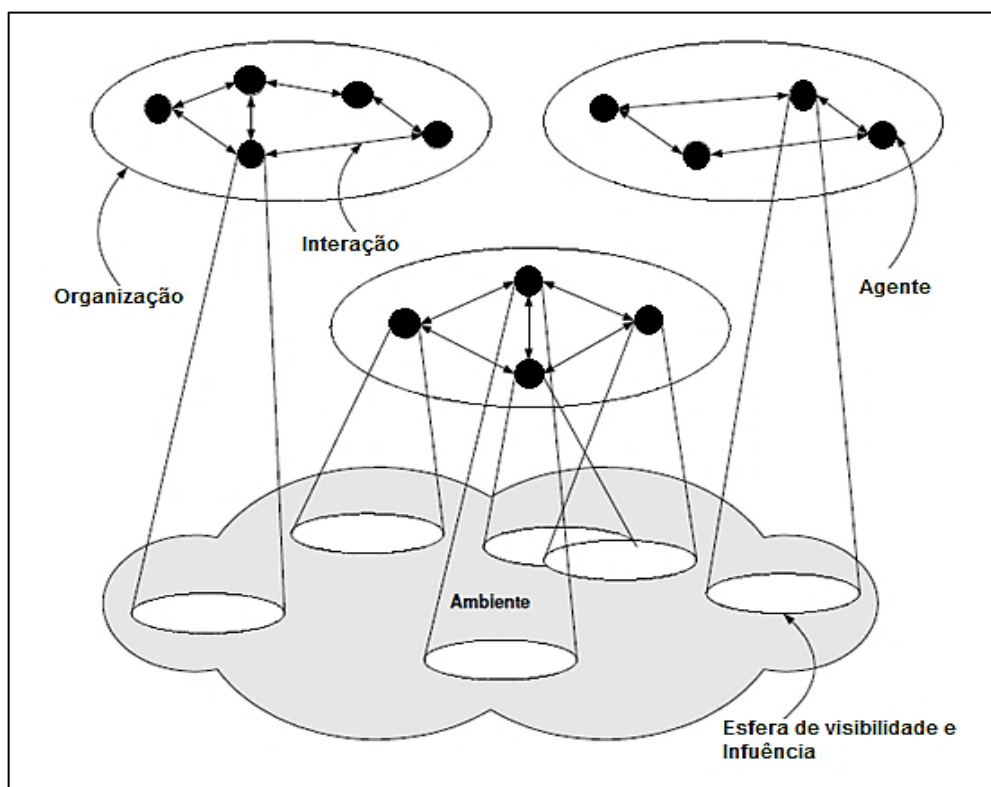


Figura 2.7 – Estrutura de um Sistema Multiagentes
Fonte: Adaptado de Jennings (2000).

Os sistemas multiagente são ideais para representar problemas que apresentam restrições relacionadas à distribuição, comunicação e visões parciais de um problema complexo. Eles possuem as vantagens tradicionais de um sistema distribuído e concorrente quanto à resolução de problemas, são capazes de agir de forma autônoma, tomando decisões levando à satisfação dos seus objetivos, são capazes de interagir entre si utilizando protocolos dedicados de interação social inspirados nos humanos e, sobretudo, são capazes de encontrar solução para problemas complexos, sem que a solução necessite ser modelada previamente, diferentemente da forma tradicional de desenvolvimento de sistemas em geral. Os tipos mais comuns de interação são (JENNINGS *et al.*, 1998):

- Coordenação: Tem como objetivo organizar problemas, resolver tarefas de modo que sejam evitadas interações prejudiciais;
- Cooperação: Tem como objetivo trabalhar em conjunto para um objetivo comum;
- Negociação e competição: Tem como objetivo chegar a um acordo que seja aceitável para todas as partes envolvidas.

Essa interação dos agentes permite a implementação de uma estrutura de controle descentralizada, que fornece de forma natural uma rápida conectividade e interação entre os agentes. Sistemas multiagentes permitem uma nova abordagem para resolução de problemas, tanto nas fases de concepção quanto na de implementação.

Os SMAs foram originalmente aplicados no domínio de negócios, fazendo uso de instalações de processamento e memória intensiva para resolver problemas complexos com base na abordagem distribuída. Exemplos desses tipos de aplicações são o comércio eletrônico e a programação. No entanto, durante os últimos anos, a aplicabilidade do SMA tem se voltado para outros domínios como os industriais, que vão desde a fabricação até o transporte, passando pelo controle de tráfego, logística e também sistemas de energia. Todas estas aplicações normalmente são problemas complexos de engenharia, caracterizados por uma rede de enorme quantidade de nós e controle que exigem robustez e adaptação em seu comportamento de coordenação. A sua utilização em *Smart Grids* tem sido uma alternativa vista como uma perspectiva promissora para fornecer comunicação (TIC) e informações necessárias a fim de apoiar as diversas funcionalidades do conceito (LEITAO; VRBA; STRASSER, 2013).

2.4.4 Padrões para desenvolvimento de SMA

FIPA significa Fundação de Agentes Físicos Inteligentes, em inglês *Foundation for Intelligent Physical Agents*, e consiste em um consórcio que desenvolve normas para o desenvolvimento de sistemas multiagente. Originalmente a FIPA foi formada como uma organização com sede na Suíça, em 1996, para produzir especificações de padrões de software para agentes heterogêneos e interativos e sistemas baseados em agentes. FIPA é vinculada a IEEE na sociedade de computadores, entidade que promove a tecnologia baseada em agentes e a interoperabilidade das suas normas com outras tecnologias (FIPA-SC23, 2004).

O padrão FIPA oferece suporte às formas comuns de comunicação entre agentes através da especificação de protocolos de interação, a partir de padrões de mensagens trocadas por dois ou mais agentes. As especificações abrangem desde a mais simples consulta de solicitação até os mais conhecidos como *Contract net* para negociação (FIPA-SC29, 2002) e o *Dutch auctions* (FIPA-SC23, 2004). Outras seções do padrão FIPA especificam outros aspectos dos agentes, tratando de forma particular a integração do agente de software, a mobilidade e a segurança do agente, do serviço de ontologias e da comunicação *Human-Agent* (BELLIFEMINE *et al.*, 2001).

A comunicação é o principal componente de um sistema multiagente, ela permite que os agentes sejam capazes de se comunicar com os usuários, com recursos do sistema e uns com os outros, a fim de realizarem tarefas de cooperação, colaboração e negociação. O KQML foi a primeira linguagem de comunicação desenvolvida para os agentes, surgiu no início de 1990 nos Estados Unidos (BLLIFEMINE *et al.*, 2007). É um protocolo de comunicação para troca de informações e conhecimento que define uma série de verbos e performativas que permitem representar a linguagem de uma forma lógica. Atualmente, a linguagem de comunicação mais utilizada entre os agentes e mais estudada é a *ACL - Agent Communication Language* padrão FIPA, que incorpora vários aspectos da KQML. As principais características do FIPA ACL são a possibilidade de utilização de linguagens diferentes de conteúdo e gestão de conversas por meio de protocolos de interação pré-estabelecidas (BLLIFEMINE *et al.*, 2007).

Outro aspecto fundamental e importante, além da comunicação, são as especificações de gerenciamento de agente, nas quais se especifica um agente compatível capaz de operar e ser gerenciado. O padrão estabelece o modelo de referência lógica para a criação, registro, localização, comunicação, migração e reforma dos agentes. O modelo de referência de gerenciamento de agente é composto pelos componentes representados na Figura 2.8 (BLLIFEMINE *et al.*, 2007).

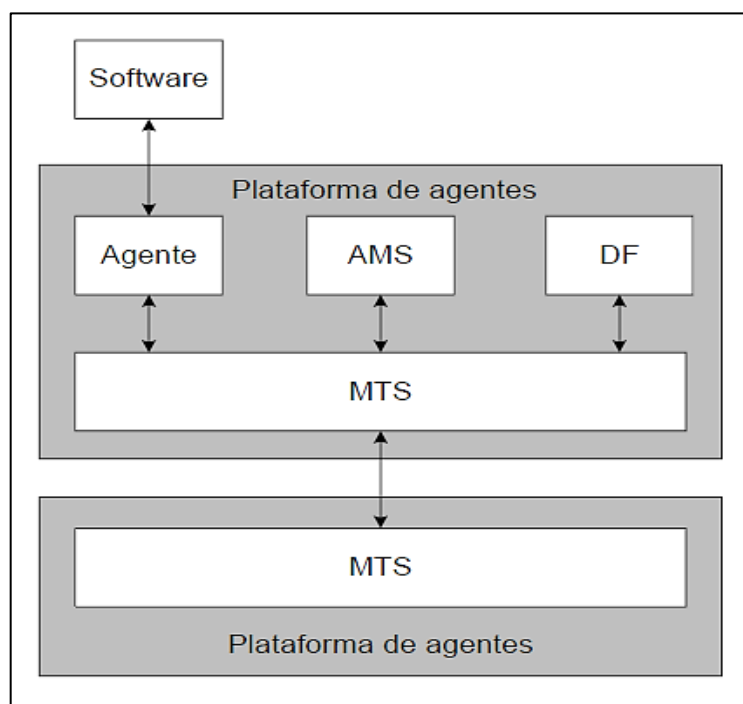


Figura 2.8 – Modelo de referência de gerenciamento de agente
Fonte: Adaptado de FIPA-SC23 (2004)

O modelo de referência de gerenciamento de agente no padrão FIPA é constituído por seis componentes lógicos, cada um representando um conjunto de capacidades (FIPA-SC23, 2004). A descrição das capacidades de cada componente, está a seguir:

- **Plataforma de Agente (AP):** Esse fornece a infraestrutura física para que os agentes sejam implantados. A AP é composta por máquinas, sistemas operacionais, componentes FIPA de gerenciamento de agente (DF, AMS e MTS) e agentes. O projeto interno de um AP é deixado a critério dos desenvolvedores de um sistema de agentes e não é uma questão da normalização FIPA. Como um único AP pode ser repartido em vários

computadores, os agentes residentes não precisam ser alocados no mesmo *host* (BLLIFEMINE *et al.*, 2007).

- Agente: Um agente é um processo computacional que habita um AP e, normalmente, oferece um ou mais serviços computacionais que podem ser publicados como uma descrição de serviço. Um agente é o fator fundamental em plataforma de agentes, que combina uma ou mais capacidades de serviço, em um modelo de execução unificada e integrada. Precisa ter, pelo menos, um proprietário e precisa suportar, pelo menos, uma noção de identidade que pode ser descrita utilizando a etiqueta de identificação de agente FIPA (AID), de modo que possa ser facilmente distinguido.
- Diretório Facilitador (DF): É um componente opcional da plataforma de agente, que se estiver presente, deve ser implementado como um serviço. O DF oferece serviços de páginas amarelas para outros agentes. Os agentes podem registrar seus serviços no DF ou consultar o DF para saber quais serviços são oferecidos por outros agentes. Dentro de uma AP poderão existir várias DFs.
- Um Sistema de Gerenciamento de Agente (AMS): É um componente obrigatório da AP. O AMS exerce um controle de supervisão sobre o acesso e uso da AP. Apenas um AMS existirá em uma única AP. O AMS mantém um diretório de AID que contêm endereços de transporte (entre outras coisas) para agentes registrados na AP. A vida de um agente como uma AP termina com seu cancelamento. A descrição de um agente também pode ser pesquisada no AMS. O AMS pode solicitar que um agente execute uma função específica de gestão, como terminar a sua execução, e tem a autoridade para fazer cumprir a operação, se o pedido for ignorado. Apenas um único AMS pode existir em cada AP, e se a AP abrange várias máquinas, o AMS é a autoridade em todas as máquinas (FIPA-SC23, 2004), (BLLIFEMINE *et al.*, 2007).
- Serviço de Transporte Mensagem (MTS): É o método de comunicação padrão entre agentes em diferentes AP (FIPA - SC23, 2002), (FIPA - SC67, 2002). As mensagens são fornecidas em um envelope de transporte que compreende um conjunto de parâmetros especificados,

por exemplo, para quem é a mensagem a ser enviada. A estrutura geral de uma mensagem FIPA está representada na Figura 2.9.

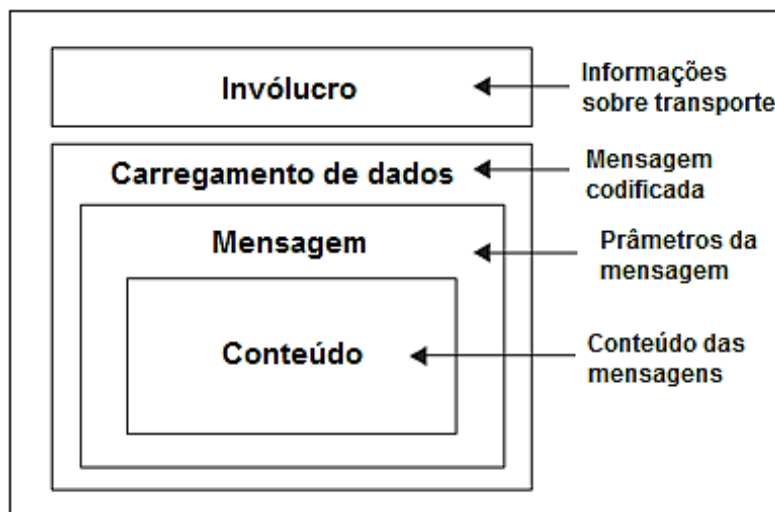


Figura 2.9 – Estrutura de mensagem FIPA
 Fonte: Adaptado de Bllifemine *et al.* (2007)

- **Software**: Descreve todo e qualquer conjunto de rotinas executáveis que não seja um agente e que possa ser acessível a partir dele.

Em uma plataforma de agente, um agente padrão FIPA pode utilizar das facilidades oferecidas pela plataforma para a realização de suas funcionalidades. Neste contexto, um agente, como um processo de software, tem um ciclo de vida que tem de ser gerido pela plataforma de Agente. Na Figura 2.10 é mostrado o ciclo de vida do agente em uma plataforma de agente, e, em seguida, a descrição de suas características e seus estados.

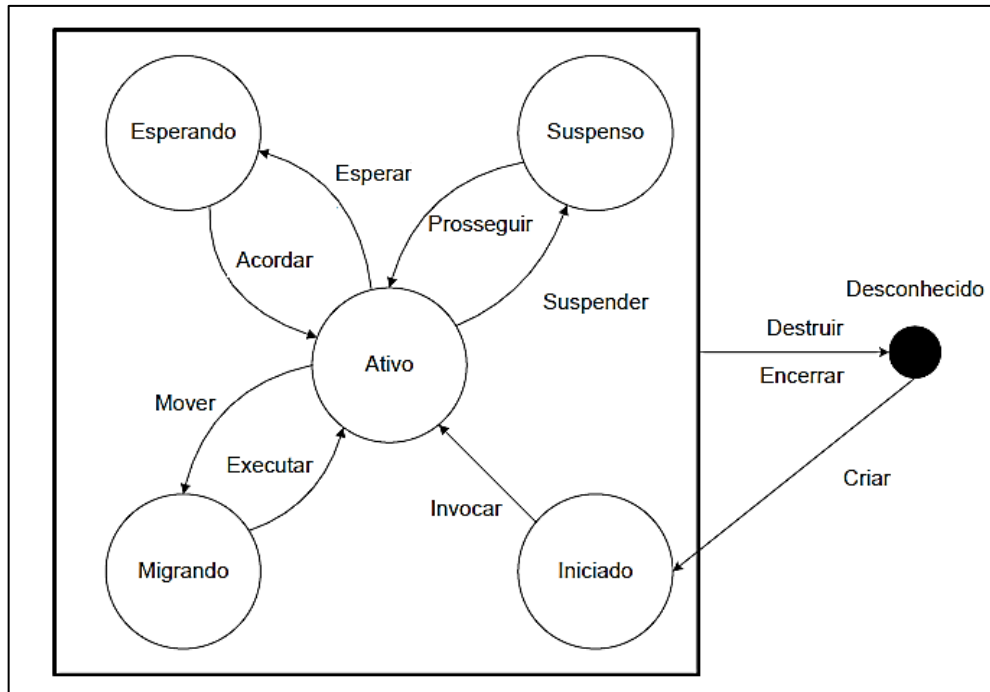


Figura 2.10 – Ciclo de vida de um agente
 Fonte: Adaptado de FIPA-SC23 (2004)

O ciclo de vida de um agente FIPA possui as seguintes características (FIPA-SC23, 2004):

- Limitado a uma plataforma de agentes: Um agente é fisicamente gerenciado dentro de uma plataforma de agentes e, portanto, o seu ciclo de vida é sempre limitado a essa plataforma de agentes.
- Independente de aplicações: O modelo de ciclo de vida é independente de qualquer aplicação, definindo somente os estados e as transições de estados ao longo da vida de um agente.
- Orientado a instância: O agente descrito no modelo de ciclo de vida é uma instância de um agente, o que significa que um agente possui um nome único e é executado de forma independente.
- Único: Cada agente possui apenas um estado de ciclo de vida em qualquer momento, e dentro de somente uma plataforma de agentes. Em seu ciclo de vida os possíveis estados de um agente (FIPA-SC23, 2004):
- Iniciado: O agente já foi criado, porém ainda não é capaz de atuar ou interagir com os outros agentes.
- Ativo: O agente registrou-se com o *AMS* recebendo um *AID* válido, tornando-se capaz de interagir com os demais agentes. No estado ativo

o agente está apto a receber e enviar mensagens a qualquer outro agente.

- **Suspenso:** O agente fica temporariamente incapaz de executar suas atividades. Essa transição pode ser causada pelo AMS ou pelo próprio agente.
- **Esperando:** O próprio agente decide ficar temporariamente inativo enquanto espera que um evento externo ocorra.
- **Migrando:** É um estado exclusivo de agentes móveis. O agente móvel é capaz de deslocar-se para outro *host* e continuar sua execução em uma máquina diferente.
- **Desconhecido:** Esse estado identifica um agente inoperante e incapaz de integrar novamente o ambiente.

As transições de estado possíveis de um agente são (FIPA-SC23, 2004), (BLLIFEMINE *et al.*, 2007):

- **Criar:** Criação ou instalação de um novo agente na plataforma.
- **Destruir:** Encerramento forçado de um agente realizado pelo AMS. O agente é impossibilitado de impedir seu encerramento.
- **Invocar:** Invocação de um novo agente fazendo com que ele se torne ativo.
- **Encerrar:** Encerramento não forçado de um agente. Essa operação pode ser ignorada pelo agente.
- **Suspender:** O agente passa do estado ativo para o estado suspenso.
- **Prosseguir:** Retorna o agente do estado suspenso para o estado ativo.
- **Esperar:** Faz com que o agente entre no estado de espera.
- **Acordar:** Retira o agente do estado de espera tornando-o ativo novamente.
- **Mover:** O agente entra em um estado transitório enquanto move-se de uma plataforma para outra. Essa transição pode ser acusada somente pelo próprio agente.
- **Executar:** Retorna o agente do estado migrando, tornando-o ativo novamente. Essa transição pode ser causada somente pelo AMS.

2.4.5 Plataforma JADE

JADE é uma plataforma de software que fornece funcionalidades *middleware* da camada de base que são independentes da aplicação específica e simplifica o desenvolvimento, assegurando o cumprimento das normas através de um conjunto abrangente de serviços e agentes do sistema. A plataforma JADE está implementada sobre uma linguagem orientada a objeto conhecida, Java, fornecendo uma interface de programação simples e amigável (BLLIFEMINE *et al.*, 2007).

O desenvolvimento da plataforma JADE foi realizado pelo grupo de pesquisa e desenvolvimento da Telecom Itália em parceria com a Universidade de Parma, entretanto, há alguns anos se tornou um projeto da comunidade e uma tecnologia *open source* (sob as normas da licença *LPGL - Lesser General Public License*), dentre as mais comuns em utilização hoje. O objetivo do JADE é simplificar o desenvolvimento de sistemas multiagente, assegurando o cumprimento das normas através de um conjunto abrangente de serviços e agentes do sistema em conformidade com as especificações do FIPA: serviço de identificação e serviço de páginas amarelas, transporte de mensagens e serviços de análise e uma biblioteca de protocolos de interação FIPA prontos a serem utilizados. O agente de uma plataforma JADE está em conformidade com as especificações do FIPA e inclui todos os componentes obrigatórios que gerenciam a plataforma, que é o ACC, o AMS e o DF. Toda a comunicação é feita através do agente de comunicação, sendo FIPA ACL a linguagem utilizada para representar mensagens (JADE, 2015), (BLLIFEMINE *et al.*, 2007).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordados a fundamentação teórica de redes elétricas de distribuição, os conceitos e características de Redes Elétricas Inteligentes, a fundamentação teórica de autorrecuperação e de sistema multiagentes. Além dos conceitos abordados de autorrecuperação, foi observada a vantagem de se utilizar sistema multiagente para resolução dos problemas de autorrecuperação. Todas estas funcionalidades agregadas a uma rede de distribuição contribuem para que a rede se torne cada vez mais inteligente, convergindo com os conceitos de redes elétricas inteligentes abordados no presente capítulo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é abordado o estado da arte dos temas concernentes a esta dissertação como a geração distribuída, ilhamento intencional em redes elétricas de distribuição, corte de carga em redes elétricas de distribuição e autorrecuperação em redes elétricas inteligentes com sistemas multiagente. Nas considerações finais do capítulo, apresenta-se o diferencial deste trabalho em relação aos apresentados na revisão.

3.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Com o crescente aumento da demanda de energia elétrica e a preocupação com o meio ambiente houve um aumento nos investimentos em novas tecnologias voltadas para fontes alternativas de energia. As fontes alternativas, conhecidas como geração distribuída normalmente estão localizadas próximas ao consumidor ou na própria instalação consumidor.

No contexto de Redes Elétricas Inteligentes, a geração distribuída tem um papel importante, pois é capaz de prover vários benefícios em larga escala quando aplicada à rede de distribuição de energia. Uma das principais contribuições da geração distribuída é a capacidade de suprir a falta de energia no consumidor, quando causada por catástrofes naturais, defeitos na rede provocados por falhas humanas ou alguma falta no sistema e equipamentos.

A geração distribuída, quando utiliza fonte de energia renovável ou energia verde, normalmente obtém-se a partir de pequenas unidades geradoras. Alguns tipos podem ter a capacidade de armazenamento de energia a fim de atender a demanda do usuário final. A potência instalada, geralmente pode variar de alguns quilowatts a megawatts. Sendo assim, a GD de pequeno e médio porte está normalmente conectada a uma rede de distribuição de baixa e média tensão, podendo fazer uso de várias tecnologias (KATEEB *et al.*, 2011).

A geração distribuída também pode ser classificada pelo porte: grande porte e o agrupamento de médio ou pequeno porte, de modo a tratar empreendimentos do ponto de vista do investimento, modo de operação. Enquanto, em geral, as unidades

de grande porte estão associadas fortemente ao setor industrial, a geração distribuída de menor porte se apresenta vinculada à realidade das residências e do setor comercial. Considera-se na geração distribuída de grande porte somente a autoprodução de energia elétrica, isto é, a geração de eletricidade do consumidor com instalações próprias de geração de energia elétrica, localizadas junto às unidades de consumo, que não utiliza, ou utiliza parcialmente, a rede elétrica das concessionárias de transmissão e/ou distribuição para o autossuprimento de eletricidade. A principal forma de autoprodução considerada é a cogeração, uma forma de uso racional da energia, uma vez que o rendimento do processo de produção de energia é significativamente aumentado a partir da produção combinada de energia térmica e elétrica, com melhor aproveitamento do conteúdo energético do combustível, muitas vezes a partir de correntes residuais do processo de produção de uma indústria específica (MME; EPE, 2014).

A presença da geração distribuída na rede de distribuição de energia elétrica de média tensão requer recursos e procedimentos operativos em relação às redes convencionais, bem como práticas de planejamento de expansão e padrões de conexão. Deve-se destacar ainda os sistemas de despacho, controle e supervisão, apoiados em uma infraestrutura robusta de telecomunicações (KAGAN *et al.*, 2013).

A geração distribuída é um dos principais benefícios introduzidos em uma rede de distribuição de energia inteligente. Os pontos de geração distribuída podem ser capazes de suprir as áreas com eletricidade quando estão isoladas da rede principal de energia devido a alguma falha nos sistemas ou de algum equipamento. Além disso, proporcionam a redução dos impactos ambientais, influenciam os aspectos econômicos – como a proteção contra os aumentos dos custos de energia oriundos das fontes fósseis e contra as indesejadas interrupções de energia elétrica. Quando conectados na rede de distribuição, proporcionam uma redução nas perdas do sistema de distribuição de energia, auxiliam na redução da demanda nos horários de pico, melhorando a qualidade de energia fornecida aos clientes.

Outra grande vantagem dos sistemas de geração distribuída é a possibilidade de possuir sistemas de armazenamento de energia como banco de baterias e *flywheels*. Esses sistemas armazenam energia durante o período de carga baixa, para ser utilizada em períodos de pico de carga, além de ter a possibilidade de serem usados como sistemas ininterruptos de energia – *SEI* (CHAKRABORTY *et al.*, 2009). Devido à possibilidade de armazenamento de

energia, o sistema de geração distribuída também pode oferecer ao usuário a possibilidade de despachar energia ao sistema elétrico de distribuição. O custo desse tipo de energia normalmente é mais alto comparado com os custos de energias oriundas do sistema elétrico convencional, mas ainda é uma vantagem devido à localização ficar próxima da carga e a diminuição da necessidade de instalações de redes de transmissão e distribuição de energia, fazendo com que o sistema tenha mais confiabilidade e estabilidade (KATEEB *et al.*, 2011). Além disso, com o passar dos anos, em alguns países como os Estados Unidos, devido ao aumento de incentivos às energias renováveis, os custos estão diminuindo, facilitando o acesso a este tipo de energia.

No Brasil, o grande estímulo à introdução de geração distribuída (geralmente localizada próxima aos centros de carga) é justificado pelos potenciais benefícios que a modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico: a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão; o baixo impacto ambiental; a redução do carregamento das redes; a redução de perdas e a diversificação da matriz energética, entre outros benefícios (ANEEL, 2014).

A introdução das Redes Elétricas Inteligentes facilita a inserção da micro e da minigeração, principalmente no cenário posterior ao lançamento da Resolução Normativa nº 482/2012, publicada em 17 de Abril de 2012, que regula essa conexão. A resolução estabelece as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. De acordo com a resolução, a microgeração distribuída é definida como central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW. Para a minigeração, a potência instalada deve estar entre 101 kW e 1 MW (ANEEL. 2014). Tanto a micro como a minigeração devem fazer uso de fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Os procedimentos para o acesso de micro e minigeração estão na seção 3.7 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.

A geração distribuída, ou recursos distribuídos na rede de distribuição, além de aumentar a confiabilidade e diminuir perdas do sistema, (M. NIAKI; AFSHARNIA, 2014) tem como objetivo garantir a melhoria da qualidade de fornecimento de energia para os consumidores frente aos distúrbios causados na rede de distribuição

(HIRODONTIS *et al.*, 2009). Uma das formas de manter as cargas mais importantes ligadas diante dos distúrbios no sistema elétrico é o ilhamento do sistema elétrico seguido de corte de carga. A implementação de ilhamento intencional de DG e Fontes Distribuídas de Energia ajuda a aumentar confiabilidade do sistema, e experiências bem-sucedidas nesse sentido têm sido relatadas na literatura Kearns e Ali (2010).

Tradicionalmente, evita-se fazer ilhamento em uma rede de distribuição, pois o sistema elétrico de potência utilitário (SEP) não foi projetado para aceitar conexão de geração e cumulação ativos a nível da distribuição.

3.1.1 Microrredes e Geração Distribuída

O conceito de microrredes se destaca no quadro evolutivo de sistemas de distribuição de energia em Redes Elétricas Inteligentes. As microrredes (tradução do inglês "*microgrids*") são redes normalmente constituídas pelas instalações de baixa tensão e/ou média tensão que atendem consumidores e também abrigam instalações de geração distribuída. Apresentam algumas particularidades em suas características como despacho localizado de energia, operação em ilha, redundância de instalações dedicadas às necessidades locais e compartilhamento de condições de carga entre seus usuários e de fornecedores de nível superior local. (KAGAN *et al.*, 2013).

Segundo Chowdhury *et al.* (2009), microrredes são redes de abastecimento de uma combinação de calor e energia de pequena escala. Essa combinação pode ser projetada para fornecer eletricidade e aquecimento para uma pequena comunidade, como um conjunto habitacional ou uma localidade suburbana, ou uma comunidade acadêmica ou pública, como uma universidade ou escola, uma área comercial, um local industrial, uma propriedade de negociação ou de uma região municipal. Na sua essência, as microrredes podem ser uma rede de distribuição ativa porque são um ajuntamento de sistemas de geração distribuída e diferentes cargas ao nível de tensão de distribuição (CHOWDHURY *et al.*, 2009).

Uma arquitetura de microrredes está ilustrada na Figura 3.1, os Padrões de interconexão local variam consideravelmente de um fornecedor de energia em

massa para o próximo. Essa norma se baseia em certas suposições sobre a contribuição de RDE – Recursos Distribuídos de Energia – para qualidade de energia e confiabilidade do sistema. Embora a norma não use o termo microrredes, que permite a implementação de um conjunto de RDE, a microrrede se refere a um Sistema Elétrico de Potência local (*SEPL*) (LASSETER *et al.*, 2003). No entanto, a aplicabilidade da norma está limitada a uma classificação de RDE de 10 MVA (ASMUS, 2014).

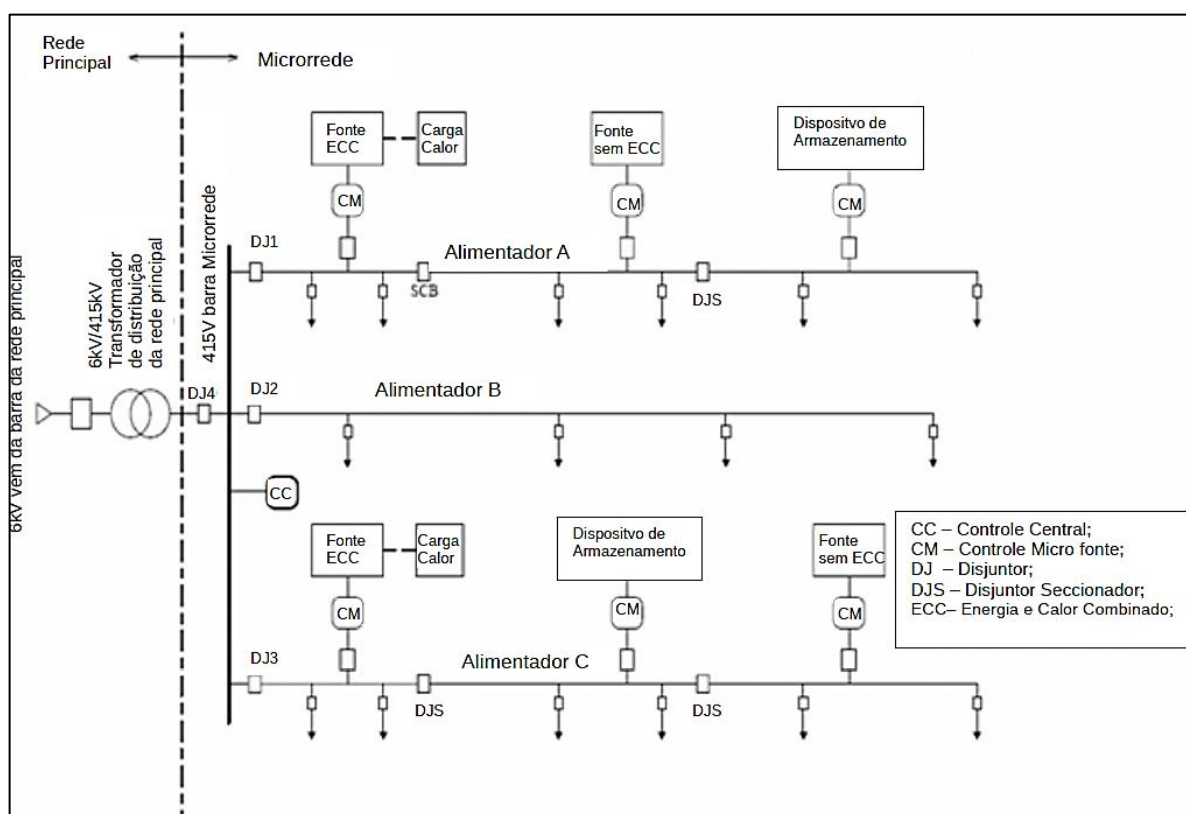


Figura 3.1 – Arquitetura de uma microrrede
Fonte: Adaptado de Chowdhury *et al.* (2009)

Normalmente, quando se trata de geração distribuída, se associam fontes primárias renováveis, como solar e eólicas, mas é importante saber que se faz presente a questão do armazenamento de energia. O fornecimento de energia por períodos relativamente longos torna-se possível devido ao avanço tecnológico das baterias e de outras tecnologias de armazenagem de energia (KAGAN *et al.*, 2013),(FALCÃO, 2009).

As principais características de uma microrrede são: a menor capacidade de geração em relação às plantas convencionais, à injeção de potência diretamente no

nível de distribuição e à proximidade entre carga e geração, para aumentar a eficiência energética diminuindo perdas elétricas e térmicas. As características que compõem as microrredes são recursos de geração baseados em energia renovável, integração entre demanda elétrica e térmica, tensão no nível de distribuição – em baixa ou média tensão – alto grau de tecnologia de comunicação – como uma rede inteligente. A microrrede corresponde a uma região geográfica pequena, alta potência de Geração Distribuída, comparável à da carga, monitoramento das cargas, geradores e equipamentos da rede de distribuição e pode ser vista pela concessionária como um único cliente, podendo operar ilhada intencionalmente, caso necessário (FALCÃO, 2009), (LASSETER; PAIGI, 2004) e (CHOWDHURY *et al.*, 2009).

Além das características citadas, a principal vantagem de uma microrrede do ponto vista energético é que ela pode ser tratada como uma entidade controlada dentro do sistema de energia. Ela pode ser operada como uma única carga agregada. Do ponto de vista dos clientes, as microrredes são benéficas para localmente satisfazer as suas necessidades elétrica e de calor. Podem fornecer energia ininterrupta, melhorar a confiabilidade local, reduzir as perdas de alimentação e fornecer suporte local de voltagem. Do ponto de vista ambiental, as microrredes podem reduzir a poluição ambiental e o aquecimento global por meio da utilização de tecnologias de baixo carbono (CHOWDHURY *et al.*, 2009).

Fazem parte de uma estrutura de microrredes interface de controle e requisitos de proteção para cada microgeração, bem como controle de tensão, controle de fluxo de potência, compartilhamento de carga durante o ilhamento, proteção, estabilidade e o controle sobre toda a operação da microrrede (LASSETER *et al.*, 2003). Do ponto de vista operacional, a microgeração deve estar equipada com um dispositivo eletrônico para controle de fontes e controles para proporcionar a flexibilidade necessária para garantir a operação como um único sistema agregado, e para manter a qualidade de energia de saída especificada (CHOWDHURY *et al.*, 2009).

Para o bom funcionamento das microrredes é importante que a microgeração e os dispositivos de armazenamento estejam equipados com Controle de microgeração – MC – que podem operar com ou sem qualquer intervenção do Controle Central - CC. O funcionamento do controle de microgeração depende em grande parte das interfaces eletrônicas de potência fornecidas na microgeração e

dispositivos de armazenamento. A microgeração garante novas conexões de microgeração adicionadas ao sistema sem que haja modificação na configuração da microrrede existente, que pode ligar e desligar-se de ou para o utilitário de forma rápida, a potência ativa e reativa pode ser controlada de forma independente, afundamentos de tensão e desequilíbrios do sistema podem ser corrigidos, as falhas podem ser manuseadas sem as perdas de estabilidade e as microrredes podem cumprir os requisitos de carga dinâmica do utilitário de alimentação. As Funções e recursos internos de um controle de microgeração – MC – são (CHOWDHURY *et al*, 2009) (KATTIRAEI *et al*, 2008):

- Controle de potência ativa e reativa;
- Controle de tensão da microrrede e sistema de gerenciamento de rede da distribuição ativa;
- Requisito de armazenamento para o rastreamento de carga rápida;
- O compartilhamento de carga por meio de um controle potência e frequência.

Já um Controlador Central - CC exerce seu controle através de dois módulos básicos, Módulo Gerenciador de Energia- EMM e o Módulo de Proteção e de Coordenação - PCM.

3.2 ILHAMENTO EM REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO

Devido ao aumento da demanda de energia e a falta de investimentos nos sistemas elétricos de potência, a falta de fornecimento de energia elétrica é cada vez mais frequente. Isso pode gerar grandes prejuízos financeiros para determinados clientes. Como exemplo, podemos citar as Indústrias, hospitais e grandes centros comerciais. Esses são clientes que quando não têm fornecimento de energia não podem realizar suas atividades de forma adequada. Dessa forma, é comum a instalação de geradores de emergência, normalmente a gás ou diesel, capazes de suprir a demanda em caso de falta de energia por parte da concessionária (MENDONÇA, 2014).

O ilhamento é definido como uma condição em que uma parte da área da rede de distribuição que consiste em cargas locais e que possui uma ou mais GD

permanece ligada quando isolada do resto do sistema, ficando fora do controle direto da concessionária local (IEEE std 1547.6, 2011).

Segundo Kearns; Ali (2010), ilhamento é um esquema na rede elétrica para isolar e energizar seções da rede com uma fonte de energia local, em caso de falta de energia. Essa fonte de energia pode proceder de uma fonte de combustível fóssil ou de tecnologias avançadas, tais como células de combustível ou baterias de armazenamento de energia.

A ausência de um sistema de controle para geração distribuída nas redes de distribuição atuais é o que torna o ilhamento inviável. Por esse motivo, existe a necessidade de aplicar técnicas e métodos para a detecção de ilhamento, para evitar que o sistema opere ilhado. A detecção de ilhamento é um requisito obrigatório para os sistemas de geração distribuída sendo estes requisitos especificados nos documentos de padronização IEEE std 1547.6 (2011) e IEEE std 1547 (2008). Em Li *et al.* (2014) e Di Fazio *et al.* (2015) são descritas algumas técnicas e métodos para detecção de ilhamentos.

Com o avanço das redes elétricas inteligentes, a inserção de Recursos Distribuídos na rede de distribuição e o novo conceito de microrredes, o ilhamento intencional se tornou possível. O comitê de padrões IEEE *Standard Association* 1547.7 (2013) propõe definições e procedimentos técnicos para operação e a integração de recursos distribuídos ilhados do sistema elétrico de potência. Os geradores distribuídos, quando operam em redes de distribuição de energia em modo ilhado e sem o devido controle, podem ocasionar afundamentos, elevações de tensão, sub e sobre tensões e violações dos níveis de frequência. Com objetivo de evitar esses efeitos indesejados no sistema, os principais fabricantes e concessionárias estabelecem que o sistema para operar de forma ilhada necessita de dispositivos de proteção anti-ilhamento do gerador o qual deverá detectar o distúrbio e desconectar o gerador de forma mais rápida possível, quando ocorrer o ilhamento. Com o uso de religadores automáticos no sistema de distribuição, esse tempo de detecção da situação do ilhamento normalmente se dá de forma rápida em até dois segundos (IEEE std 1547, 2008).

Em Chowdhury *et al.* (2011), são citados alguns aspectos comerciais e econômicos para tornar uma determinada área ilhada com geração distribuída de forma a alavancar o interesse de investimentos das concessionárias e comercializadores de energia, devido aos impactos causados por este tipo de

operação. Os aspectos técnicos da geração distribuída a ser ilhada e as análises técnicas de proteção e controle dos geradores distribuídos são pontos importantes que devem ser considerados em um ilhamento intencional.

Nos últimos anos, em várias partes do mundo, o ilhamento tem sido alvo de vários estudos, com métodos de se detectar ilhamento e padronizações de metodologia para operação de um sistema ilhado. Embora isso atualmente não seja muito viável, existem vários benefícios que devem ser considerados em sistema ilhado. A operação da geração distribuída no modo ilhamento é benéfica, pois melhora a confiabilidade do fornecimento de energia para consumidores de energia elétrica. Além disso, a geração distribuída contribui para a confiabilidade do fornecimento de energia, reduzindo ou retardando a necessidade de reforçar a rede de distribuição para cumprir com as normas legais de confiabilidade, diminuindo custos. O principal benefício da operação ilhada da geração distribuída é o fornecimento de energia durante a interrupção causada pela desconexão de uma parte da rede elétrica da rede principal (CHOWDHURY *et al.*, 2011). Para a operação do sistema ilhado, existem várias configurações de funcionamento conforme a Figura 3.2. O IEEE Std 1547.4 (2011) apresenta sete tipos de configurações de ilhamento planejado no sistema elétrico de potência:

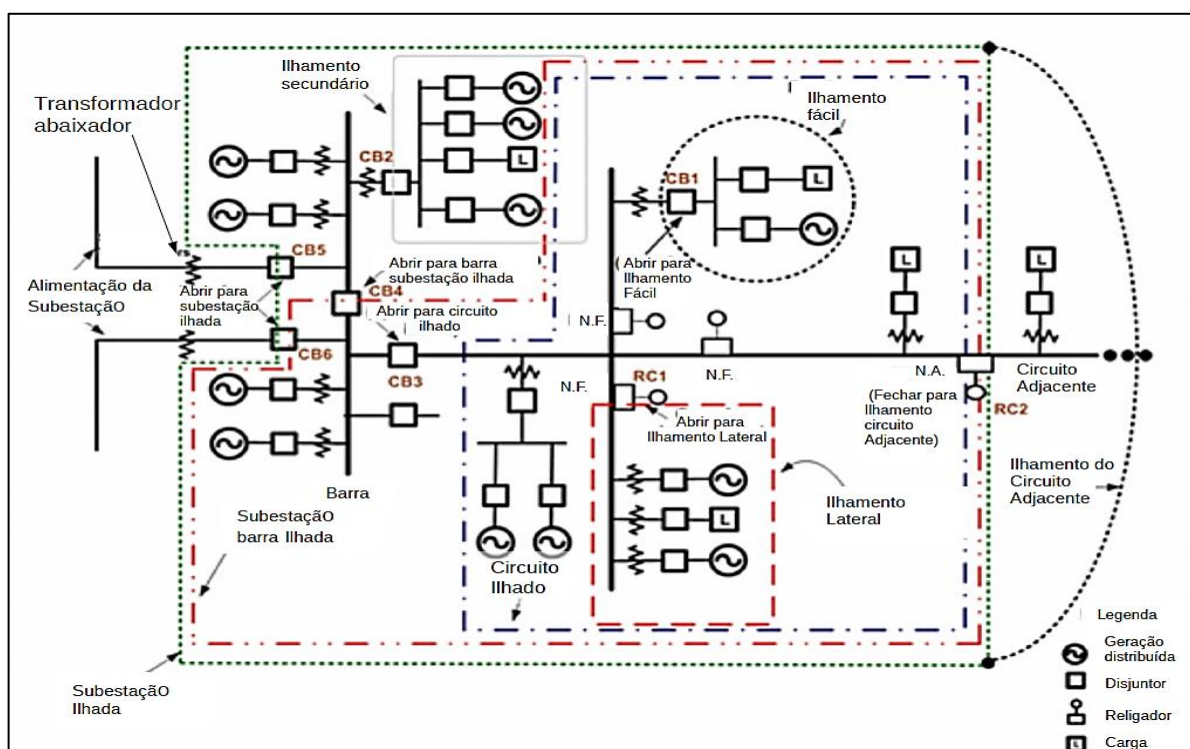


Figura 3.2 – Exemplos dos possíveis tipos de ilhamento com GD
Fonte: Adaptado de IEEE Std 1547.4 (2011)

a. Ilhamento do SEP local (ilha fácil)

Em uma ilha SEP local, ilustrada na figura 3.2, um sistema de Recursos Distribuídos – RD – de ilhas é formado a partir de geração e de carga, normalmente atendido dentro de uma instalação do cliente. Isso também é chamado de ilha fácil. Este sistema RD de ilha tem apenas um *PCC (CB1)* com as SEP da área. Uma facilidade é que o RD pode ser operado para servir a carga da instalação, quando existe uma perda dos SEP da área. Caso o RD e o SEP locais decidam criar um ilhamento intencional, o operador SEP da área precisa seguir o método de operação de forma ciente;

b. Ilhamento no secundário

Uma ilha secundária consiste em um ou mais RDs e múltiplos clientes ligados à rede no lado do secundário de um transformador de distribuição. Pode haver várias ilhas secundárias em uma única distribuição de lateral. Por exemplo, unidades de armazenamento de energia de comunidade podem ser implantadas em ilhas secundárias. Outras formas de RD podem ser instaladas na ilha do secundário, juntamente com o armazenamento de energia de comunidade.

c. Ilhamento lateral

Na ilha lateral, uma ilha é formada a partir da carga normalmente atendida a partir de uma geração ao lado sobre um circuito de distribuição. A geração pode ser operada para servir a carga da ilha quando o dispositivo de comutação lateral (por exemplo, o disjuntor, religador ou seccionador) abre (RC1).

d. Ilhamento no Circuito

Em uma ilha de circuito, uma ilha é formada a partir de uma carga normalmente atendida por meio de um circuito de distribuição único. Para a perda da alimentação da subestação, transformadores, ou barra, RD podem ser operados para servir a carga do circuito abrindo CB2.

e. Ilhamento no barramento da subestação

Na ilha barramento de subestação, uma ilha é formada a partir de carga normalmente atendida a partir de um único barramento dentro de uma subestação, embora vários barramentos possam ser usados para servir cargas a partir da subestação. O RD em um barramento específico pode ser operado se houver uma perda de um transformador de alimentação ou subestação. Essa operação implica na abertura secundária (lado de baixa voltagem) do disjuntor transformador (CB5) na

alimentação do transformador e operar o disjuntor secção (CB3) ou aberto ou fechado.

f. Ilhamento na subestação

No ilhamento da subestação, uma ilha é formada a partir de carga normalmente atendido a partir de uma única subestação. Essa ilha pode ser usada quando a subestação de distribuição está fora de serviço ou quando um transformador está fora de serviço e o transformador remanescente não é capaz de atender toda a carga da subestação. Essa ilha pode ser utilizada para aliviar uma sobrecarga ou um problema de tensão na subestação fonte ou um problema da sobrecarga nos transformadores. Executando o RD nos dois barramentos, reduz-se a carga sobre essas alimentações e transformadores e pode-se melhorar os níveis de tensão. O secundário (lado inferior tensão) do transformador da subestação abre os disjuntores (CB4 e CB5) para criar o sistema de ilha com RD.

g. Ilhamento do circuito adjacente

No circuito ilha adjacente, um circuito de carga adjacente pode ser atendido a partir de uma parte do circuito ilhado. Isso no caso da perda do circuito de alimentação adjacente e perda da subestação principal alimentada. Aqui, o RD na barra da subestação, e no circuito, pode ser executado, incluindo a instalação de RD, abrindo CB4 e CB5 e fechando RC2.

Em um futuro próximo, no Brasil, podemos considerar que as práticas de se desligar uma geração distribuída sempre que ocorra o risco de ficar ilhada possam não ser tão primordiais nos métodos de operação do Sistema Elétrico. Porém, estão disponíveis no documento de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional/PRODIST, no Módulo 4 (ANEEL, 2010) fornecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, procedimentos operacionais de operação de geração distribuída por possíveis centros de despacho de geração distribuída. Entre os procedimentos e orientações no documento a serem implementadas, está estabelecido que a geração distribuída deve ser capaz de manter a frequência e a tensão da parte ilhada da rede dentro dos valores padrão estabelecidos (LIMA, 2013).

A importância de se ter uma geração distribuída que pode ser ilhada intencionalmente inclui locais em que os cenários para manter o sistema elétrico ligado deve ter uma certa prioridade, como em situações: (a) de mudanças climáticas, nas quais as condições meteorológicas severas causam crescente

desagregação das redes de distribuição (ou transmissão), incluindo as temperaturas extremas, tempestades, gelo e nevascas; (b) os cortes de energia, devido à escassez de abastecimento de combustível; (c) os cortes de energia devido a grandes variações de demanda, como no alto verão, com cargas de ar condicionado impulsionadas pelas alterações climáticas; (d) os ataques terroristas de infraestrutura de rede; (e) e ilhamento planejado para interrupções do sistema (CHOWDHURY *et al.*, 2011).

Com as redes elétricas inteligentes, pode haver um aumento na confiabilidade nas futuras redes de distribuição, reduzindo as possibilidades de ilhamento. No entanto, com o aumento da penetração da geração distribuída, esse investimento poderia ser melhor dirigido para a operação ilhada, o que exigiria incentivos comerciais e econômicos aos consumidores e para indústria, objetivando o avanço tecnológico nesta área.

3.3 CORTE DE CARGA EM REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO

Um dos maiores problemas para se controlar um ilhamento da geração distribuída em uma rede de distribuição é durante a conexão e desconexão com a rede de distribuição principal. Quando o ilhamento ocorre em uma rede de distribuição, a tensão e a frequência sofrem um desequilíbrio causado pela variação da demanda de geração em relação à carga. Nesse caso, a variação de frequência pode levar o sistema de energia ao colapso se não se recuperar rapidamente. Para evitar que todas as cargas sejam desligadas devido ao desbalanceamento de frequência, é necessário um planejamento de desligamento, lançando mão de algumas cargas, a fim de manter o sistema em funcionamento e evitar um desligamento total (LIMA, 2013). Para o controle de frequência em condições anormais, o corte de carga realizado através de relés que utilizam a função (relé 81) de sub e sobre frequência é uma das técnicas mais comumente utilizadas (LAGHARI *et al.*, 2012). Em Lima (2013), o autor elaborou um planejamento do ilhamento por meio do monitoramento e controle dos níveis de tensão e de frequência, estabelecendo um critério da separação do sistema em ilhas menores de pequeno porte, considerando o corte de carga na ilha, sempre que necessário.

Outra forma de cortar carga é no momento da restauração de sistema, após a ocorrência de um desligamento causado por defeito na rede, levando parte do sistema a ficar ilhado para colocar em funcionamento as cargas que ficaram fora de serviço por outro alimentador ou por uma geração distribuída em sistema ilhado. Nesse caso, é necessário verificar se a fonte pode suportar a carga, caso contrário, algumas cargas devem ser desligadas por critério de prioridade, para que as cargas possam ser atendidas (ZIDAN, 2012). Nos trabalhos de Zidan (2012) e Zidan (2013), são apresentadas soluções de corte de carga no sistema elétrico durante o processo de restauração caso o algoritmo de restauração identifique que a fonte não consiga suportar a carga e garantir as restrições de tensão.

Neste trabalho são propostos um sistema de autorrecuperação seguido de ilhamento intencional e um plano de corte de carga baseado em prioridades, quando ocorrida uma falta permanente em uma rede de distribuição. O ilhamento irá ocorrer nas situações em que o sistema de restauração identificar que não existe a possibilidade de atender uma determinada carga que tem prioridade no atendimento. Nesse caso, se o modelo proposto identifica que a geração distribuída na zona do ilhamento não tem condições de assumir todas as cargas é aplicado o corte de carga nas cargas com menor prioridade.

3.4 AUTORRECUPERAÇÃO EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES COM SISTEMA MULTIAGENTES

Existem vários estudos sobre resolução do problema de autorrecuperação, devido à grande demanda de aplicação de um sistema de autorrecuperação (*FLISR*) dentro do contexto de redes elétricas inteligentes. O problema de autorrecuperação não é um problema trivial que se resolve somente com lógica booleana, por isso várias técnicas têm sido alvo de estudos para resolver esse problema.

Em geral, um problema de restauração pode ser modelado como um sistema multiobjetivo, em várias fases, combinatória, não linear e problema de otimização. A complexidade na resolução desse problema está na característica de uma rede de distribuição, devido à sua radialidade, com várias ramificações com alguns quilômetros de distância e um número expressivo de equipamentos ao longo

do alimentador. Portanto, é necessário buscar algum método eficaz para o problema de autorrecuperação. Para resolver o problema de restauração, algumas técnicas são abordadas, como: Sistemas especialistas, Lógica Fuzzy, Redes de Petri, Busca heurística, Algoritmos Genéticos, Otimização por enxame de partículas, Busca Tabu, Redes Neurais Artificiais, Sistemas Multiagentes e Modelos Híbridos (SCHULZ *et al.*, 2007). Dessas técnicas citadas, grande parte são sistemas de tomada de decisão centralizados, na maioria dos quais a tomada de decisão parte de um centro de controle integrado com um sistema SCADA. Isso não ocorre no sistema multiagente, que tem uma característica de um sistema descentralizado, em que cada dispositivo instalado na rede pode ser um agente, o que pode ser uma vantagem com relação aos outros sistemas, devido ao grande volume de equipamentos instalados ao longo da rede de distribuição. É importante observar nas abordagens centralizadas que utilizam técnicas tradicionais uma desvantagem com relação à confiabilidade do processo, pois todos os dados devem ser centralizados em um único ponto, sendo esse um ponto crítico, pois caso aconteça alguma falha neste ponto central, todo o sistema fica comprometido. Diferentemente, uma solução com sistemas multiagente que traz uma abordagem de inteligência artificial distribuída pode ser mais robusta, uma vez que ao ocorrer uma falha local essa pode ser corrigida automaticamente pela auto organização dos agentes.

Sistemas multiagente são utilizados cada vez mais em várias aplicações como controle de planejamento, processo e redes de comunicações. Alguns trabalhos semelhantes que propõem soluções de desenvolvimento utilizando sistemas multiagentes são relatados a seguir.

No trabalho de Zidan e El-Saadany (2012), é apresentada uma proposta de autorrecuperação utilizando os sistemas de multiagente. O algoritmo proposto é dividido em duas camadas, agente zona e agente alimentador. Na primeira camada, estão localizados os agentes zonas, que têm como função o monitoramento para viabilizar a realização dos cálculos e as execuções das ações de controle. Na segunda camada, estão os agentes alimentadores, que são responsáveis por realizar as negociações de carga. O processo de autorrecuperação é dividido em duas etapas: a primeira etapa contempla a identificação e a isolamento da falta, levando em conta geração distribuída; a segunda etapa é referente ao serviço de restauração, contemplando estratégias de restauração. As regras utilizadas no algoritmo para tomada de decisão são regras extraídas de situações práticas. O

processo de restauração segue a restauração de todo o grupo fora de serviço, restauração das zonas, realizando combinações para transferir as cargas fora de serviço através de caminhos adequados, a transferência de carga e o corte de carga, pelo método de priorização de cargas.

Em Barros (2013), é apresentada uma solução de autorrecuperação de rede de distribuição e subestação utilizando os sistemas de multiagente (SMA). Em seu trabalho, os autores propõem um sistema formado por três tipos de agentes: agente dispositivo, agente alimentador e agente subestação. Os agentes dispositivos estão associados aos equipamentos do sistema e são responsáveis pela coleta de informações da rede; os agentes alimentadores são responsáveis pelo gerenciamento dos alimentadores do sistema; e os agentes subestação são responsáveis pelo gerenciamento da capacidade de suprimento da rede. São apresentados também os comportamentos e interações dos agentes do sistema durante o processo de recomposição, visando restabelecer a energia elétrica dos trechos desenergizados e não defeituosos, afetados por falta no alimentador ou falta no transformador da subestação. Para as simulações, utilizou-se um simulador de desenvolvimento próprio que interage com o *framework* JADE, no qual se observa a interação entre os agentes. Além de localizar falta, isolar o trecho defeituoso e restaurar o sistema, o seu algoritmo considera restrições operacionais e descoordenação do sistema de proteção.

Em Schulz *et al.* (2007), é apresentada uma estrutura de sistema multiagente para um sistema de autorrecuperação. Os autores propõem agilidade no reestabelecimento de energia após uma falha, utilizando uma abordagem de sistemas centralizados. Para a restauração, utiliza plataforma JADE como uma estrutura multiagente. A proposta contempla três tipos de agentes: os agentes chave (SA), agentes de carga (LA) e um agente gerador (GA).

Saraiva (2012) apresenta um sistema de multiagente desenvolvido para simulação computacional de um sistema de distribuição elétrico do tipo *smart grid*, buscando executar a reconfiguração topológica do sistema a partir de dados de carga capturados de forma distribuída pelos agentes dispersos na rede elétrica. O modelo proposto em seu trabalho consiste em quatro tipos de agentes: os agentes alimentadores, responsáveis por monitorarem os alimentadores do sistema; os agentes chave, que verificam as chaves do sistema e seus estados; os agentes carga, responsáveis por verificar as demandas das cargas do sistema e também por

realizarem alguns cálculos; e o agente demanda modificada, agente que serve apenas para enviar mensagens aos agentes carga que terão sua demanda alterada no decorrer da simulação computacional, dando uma característica dinâmica ao sistema. Nesse trabalho, o autor aborda um cenário que utiliza sistemas multiagente dentro do contexto de *smart grids*, para gerenciamento e operação da rede de distribuição, sob o ponto de vista de reconfiguração da topologia da rede.

Em Nagata e Fukunaga (2011), é apresentada uma proposta de sistemas multiagente descentralizada para a recomposição de linhas de transmissão. O sistema é composto por vários agentes subestações e agentes linhas. Na ocorrência de uma falta em uma das linhas de transmissão, a subestação desenergizada mais próxima da falta tem seu agente definido como responsável pelo gerenciamento da recomposição e os demais agentes-subestação que possuem encontros com linhas energizadas são definidos como subgerentes. O algoritmo é dividido em três etapas. Na primeira etapa, é definida a área afetada pela falta e são selecionados o agente responsável pelo gerenciamento da recomposição e os subgerentes. Na segunda etapa, são coletados os dados de potência disponível através dos subgerentes. Na terceira etapa, é iniciado o processo de reenergização das subestações. O sistema define qual dos subgerentes deve energizar sua subestação com base na maior potência disponível pela fonte e, em seguida, analisa a possibilidade de expandir a quantidade de subestações reenergizadas por essa fonte.

Em Fernandez *et al.* (2014), os autores sugerem uma arquitetura distribuída baseada em agentes para controle de Redes Elétricas Inteligentes. O sistema multiagente realiza as tarefas de processos de detecção de falha e reconfiguração automática em tempo real. O processo contempla minimização de perdas e balanceamento de cargas na rede de distribuição. Essa tarefa é realizada através de um algoritmo de Enxame de Partículas *PSO*. A proposta compreende uma arquitetura multicamada para o monitoramento das redes elétricas, realizado por um nó inteligente de rede composto por três camadas, todas estas superiores à camada de transporte de rede. A primeira camada inferior é o *middleware DDS* em tempo real. A segunda camada é a camada ontológica, na qual são organizados os modelos de dados do aplicativo de monitoramento. A terceira camada é a camada multiagente implementado em *JADE*, que cuida do controle e monitoramento das tarefas do algoritmo.

Em Xia *et al.* (2014), é proposta uma estrutura hierárquica para realização de autorrecuperação em *smart grids*. A proposta consiste em um agente de controle na camada central que adota uma função para prever estabilidade no sistema através dos dados de medições de área. Agentes com informações compartilhadas na camada inferior são responsáveis pelos ajustes de proteção dos equipamentos de conexão nas microrredes. Isso garante uma segurança durante o processo de autorrecuperação com relação à proteção dos equipamentos instalados na rede de distribuição.

Liu *et al.* (2012) apresenta o conceito e uma estrutura de sistema de autorrecuperação de rede de energia urbana (*UPG*) controlado por um sistema multiagente. A estrutura de autorrecuperação baseada em multiagente é dividida em três camadas, sendo que cada uma possui vários agentes. O método proposto pelos autores está dividido em quatro subcontroles e cinco estados operacionais. Os subcontroles são: controle de emergência, controle restaurador, controle corretiva e preventiva ao controle. Os cinco estados operacionais têm como base o estado de funcionamento do método que são: estado de emergência, estado restaurativo, estado de alerta, estado normal não seguro e estado normal seguro. Utilizando essa estrutura como base, os autores apresentam um caso prático de teste, baseado na rede de energia urbana em *Jiangning County* na China. O caso demonstra a capacidade do sistema baseado em agente em executar a funcionalidade de autorrecuperação e as características do sistema proposto em auto ajustar-se para atingir os objetivos operacionais pretendidos.

A seguir, a tabela 3.1 ilustra um quadro comparativo das soluções apresentadas neste capítulo.

TABELA 3.1 – RESUMO DOS SISTEMAS DE AUTORRECUPERAÇÃO UTILIZADOS EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Referência	Tipo de agente	Aplicação	Geração distribuída	Ilhamento	Corte de Carga
Zidan e El-Saadany (2012)	Agente Alimentador, Agente Zona	Autorrecuperação de rede de distribuição utilizando sistemas Multiagente	Sim	Não	Sim
Barros (2013)	Agente dispositivo, Agente alimentador e Agente subestação	Autorrecuperação de rede de distribuição utilizando sistemas Multiagente	Não	Não	Não
Schulz <i>et al.</i> (2007)	Agente chave (SA), Agentes de carga (LA) e Agente gerador (GA).	Autorrecuperação de rede de distribuição utilizando sistemas Multiagente	Sim	Não	Não
Saraiva (2012)	Agente alimentador, Agente chave, Agente carga e o Agente demanda modificada	Autorrecuperação de rede de distribuição utilizando sistemas Multiagente	Não	Não	Não
Nagata e Fukunaga (2011)	Agente subestação e Agente linha	Autorrecuperação de Linhas de transmissão utilizando sistemas Multiagente	Não	Não	Não
Fernandez <i>et al.</i> (2014)	Agente subestação secundária, Agente reconfiguração e Agente de gerenciamento de alarme	Autorrecuperação de rede de distribuição utilizando sistemas Multiagente	Não	Não	Não
Xia <i>et al.</i> (2014)	Agente de linha, Agente de controle central e Agente de reconfiguração	Autorrecuperação de rede de distribuição e micro grids utilizando sistemas Multiagente	Sim	Sim	Não
Liu, H; Chen, X; Yu, K; Hou (2012)	Agente de Emergência, Agente de Restauração, Agente Corretivo e Agente Preventivo	Autorrecuperação de rede de distribuição utilizando sistemas Multiagente	Sim	Não	Sim

Fonte: O autor, 2015.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi apresentada uma revisão de literatura dos conceitos importantes no contexto de Redes Elétricas Inteligentes. O capítulo abordou aspectos importantes de geração distribuída e microrredes, ilhamento intencional e corte de carga em redes elétricas de distribuição. Os conceitos de ilhamento e de corte de carga abordados neste capítulo são de funcionalidades importantes que agregam vantagens de serem instaladas em uma rede de distribuição que possui uma função de autorrecuperação. Todas essas funcionalidades agregadas a uma rede de distribuição contribuem para que a rede se torne cada vez mais inteligente, corroborando com os conceitos de redes elétricas inteligentes abordados neste capítulo. Foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre os diversos temas de sistemas multiagente e autorrecuperação, em nenhum deles foi apresentado um sistema de ilhamento intencional seguido de corte de carga, o que é a apresentado neste trabalho. No próximo capítulo, será apresentada a proposta de um modelo computacional de sistemas multiagente para resolver o problema de autorrecuperação na rede de distribuição. A metodologia é composta por quatro tipos de agentes que isolam a falta e realizam o reestabelecimento de energia para as cargas fora de serviço.

4 PROPOSTA DE UM MODELO PARA AUTORRECUPERAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES UTILIZANDO UMA ABORDAGEM MULTIAGENTE

Este capítulo apresenta a modelagem da metodologia proposta detalhando os critérios e todos os passos da metodologia, bem como a estrutura de comunicação e interação dos agentes, a descrição das etapas da metodologia e os cálculos de capacidade dos alimentadores.

4.1 PROPOSTA DO MODELO DA METODOLOGIA

O sistema de autorrecuperação proposto está totalmente inserido no contexto de Redes Elétricas inteligentes, considerando que um sistema de autorrecuperação é uma das funcionalidades de redes que se enquadram nesse conceito. A inserção das GDs e o conceito de sistemas ilhados também fazem parte desta metodologia.

A metodologia proposta é baseada em sistemas multiagente, sendo que não foi utilizada uma técnica de otimização (meta-heurísticas e programação matemática) para resolver o problema de restauração de cargas fora de serviço. Os agentes desenvolvidos para esta metodologia possuem a característica de agentes reativos, ou seja, reagem conforme a percepção do ambiente que estão inseridos.

O presente trabalho propõe desenvolver um sistema de autorrecuperação de rede de distribuição de média tensão, através de uma estrutura de software baseada em sistema multiagente, que após um distúrbio no sistema irá localizar, isolar a falta e recompor as cargas que ficaram fora de serviço. Estão incluídos no processo de restauração um plano de ilhamento intencional e um plano de corte seletivo de carga. O que se espera como consequência de um processo apropriado de autorrecuperação pode influenciar em melhores índices de qualidade de energia, diminuindo os indicadores de continuidade de serviço da ANEEL como DEC e FEC.

O modelo de autorrecuperação apresentado nesta dissertação é composto por quatro tipos de agentes reativos: agente alimentador (AAL), agente zona (AZ),

agente dispositivo (AD) e agente geração distribuída (AGD). Os agentes alimentadores são responsáveis por todas as negociações e cálculos para transferência de carga entre alimentadores. Os agentes zona são responsáveis pelas informações dos valores de demanda das cargas, fator de prioridade e o seu próprio status. Os agentes dispositivo são responsáveis pela identificação da falta e isolamento da zona onde ocorreu o defeito. Os agentes geração distribuída são responsáveis por enviar seu estado e sua capacidade de geração.

A metodologia de autorrecuperação em Redes Elétricas Inteligentes (REI) proposta nesta dissertação é ilustrada na Figura 4.1. A metodologia proposta possui quatro etapas, a fim de que, ao final do processo, todas as cargas possíveis sejam reestabelecidas conforme os critérios de cada etapa e respeitando as restrições e limites do sistema. O plano de corte seletivo de carga e as três primeiras etapas da metodologia proposta nesta dissertação foram baseadas na proposta apresentada por Zidan; El-Saadany (2012), sendo o ilhamento intencional executado na quarta etapa uma contribuição deste trabalho. O sistema multiagente tem o objetivo de localizar e isolar as falhas, decidir e implementar as operações de chaveamento para maximizar a quantidade de cargas restauradas (ALI; ZIDAN, 2013).

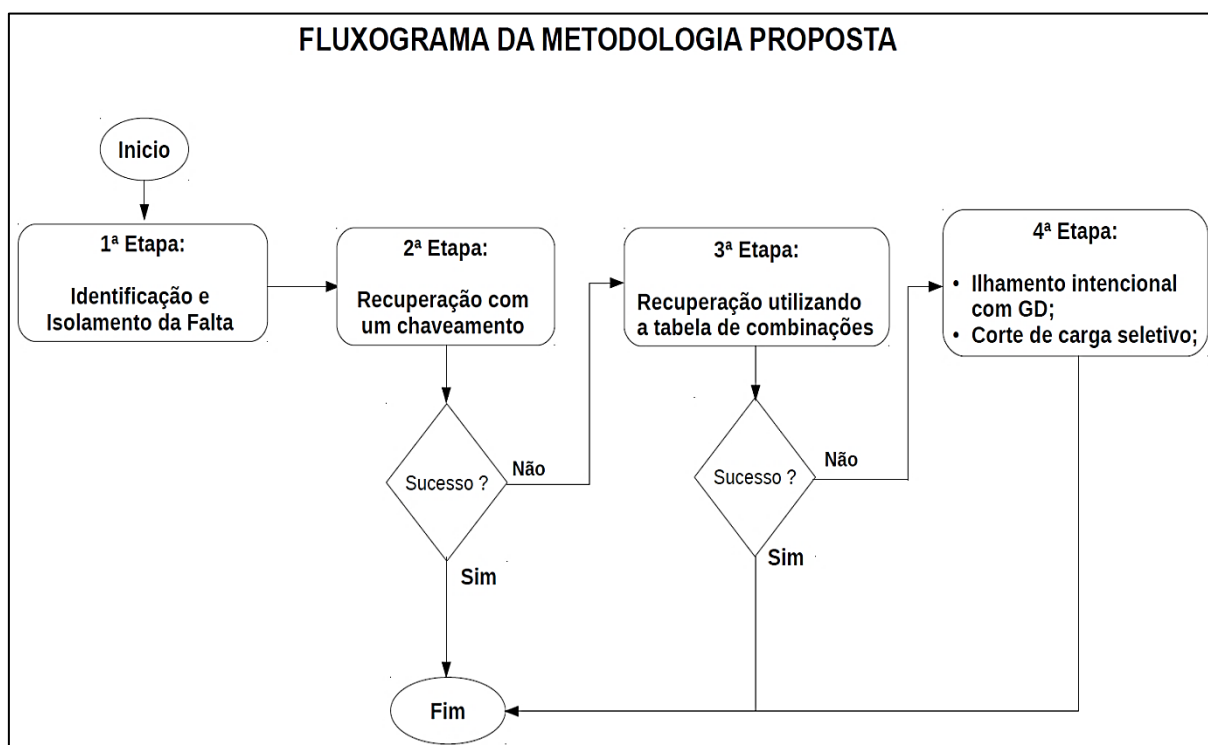


Figura 4.1 – Proposta do modelo de Autorrecuperação
Fonte: O autor, 2015.

O processo inicia-se com a ocorrência de uma falta permanente na rede de distribuição. A primeira etapa é o processo de **localização da falha** e o isolamento da mesma, sendo o responsável por esta etapa o agente dispositivo que identifica a falha e inicia o processo de isolamento.

Na segunda etapa, logo após isolar a falha, inicia-se o processo de reestabelecimento das cargas que ficaram fora de serviço. Nessa etapa o agente alimentador (iniciador) inicia a negociação com os demais agentes alimentadores vizinhos "opção 1". A negociação realizada pelo agente iniciador tem o objetivo de tentar o **reestabelecimento de todas as cargas com somente um chaveamento**. Havendo sucesso nessa operação, em seguida o processo de autorrecuperação é finalizado nessa etapa, caso contrário, inicia-se a terceira etapa. Na terceira etapa, o agente alimentador (iniciador) responsável pela negociação constrói uma tabela com as combinações possíveis de todas as zonas fora de serviço e verifica a possibilidade de **restauração das zonas através de combinações**. Caso não consiga realizar a restauração, ainda nessa etapa, o agente inicia o processo de subcontrato, que se refere à transferência de carga do alimentador "opção 1" para o alimentador "opção 2", para que o alimentador "opção 1" consiga assumir as combinações das zonas fora de serviço listadas na tabela. Não havendo sucesso, o agente passa para a quarta etapa, na qual se verifica a existência de **geração distribuída nas zonas fora de serviço** e executa-se o **corte seletivo de carga por prioridade**. O detalhamento e a descrição das etapas são apresentados no item 4.3 deste capítulo.

Na metodologia proposta, há uma interação com um modelo fluxo de carga (MATPOWER) para a determinação do estado operativo do sistema elétrico no instante de pré-falta e verificar se o sistema com a solução sugerida pelo sistema multiagente irá operar adequadamente, dando suporte para indicar ou prevenir situações inadequadas de operação no estágio pós-recuperação, tal como mostrado na Figura 4.2. A interação inicia-se com uma modelagem de uma rede de distribuição no Matlab, em seguida executa-se um fluxo de carga da rede de distribuição. Com os resultados gerados pelo fluxo de carga – os dados de pré-falta –, o sistema multiagente recebe os dados para execução do processo de autorrecuperação. Assim que o sistema multiagente executa todas as etapas, ao final de cada etapa é executado novamente um fluxo de carga para verificar se o resultado apresentado pelo sistema multiagente está obedecendo às restrições imposta pela proposta.

Caso as restrições não forem atendidas nas segunda e terceira etapa, o algoritmo passa para a próxima etapa. No entanto, após a quarta etapa, o fluxo de carga verifica que as restrições não foram atendidas e o mesmo retorna os resultados para quarta etapa e realiza o corte de mais carga. Em seguida, na próxima interação através do fluxo de carga, verifica-se novamente a ação até que os valores de restrição sejam respeitados.

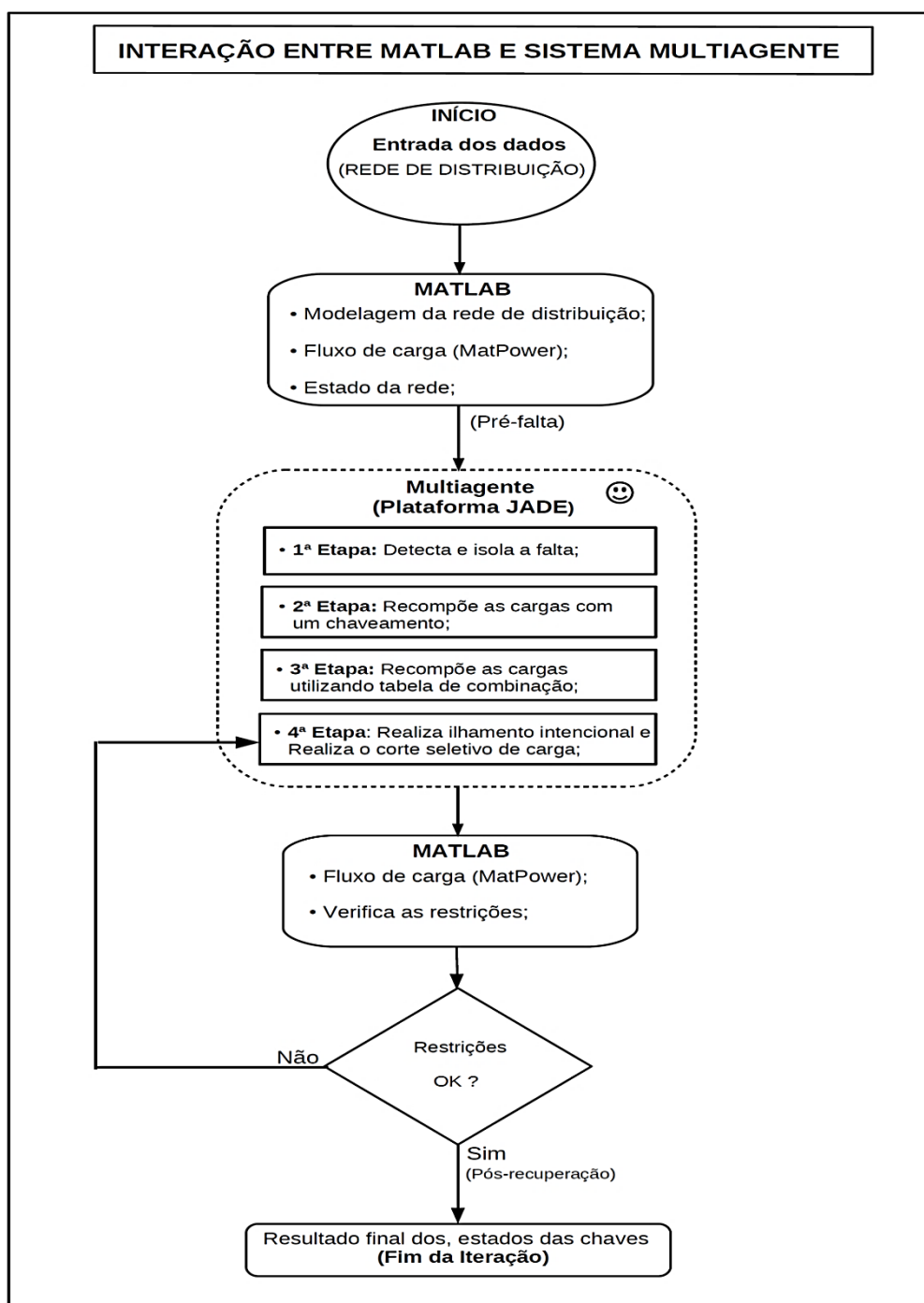


Figura 4.2 – Fluxo da Interação entre Matlab e JADE.
Fonte: Adaptado de Zidan; El-Saadany (2012)

4.2 ESTRUTURA E COMUNICAÇÃO DOS AGENTES

O processo de autorrecuperação proposto tem uma estrutura de comunicação em dois níveis, cada uma com sua função na estrutura, conforme mostrado na Figura 4.3 a seguir. O agente alimentador (iniciador) é o agente que recebe as informações de indicação da zona fora de serviço dos agentes dispositivo, e inicia todo o processo de negociação entre os agentes. A negociação se restringe somente aos agentes alimentadores. O agente alimentador sempre inicia a comunicação com o agente alimentador vizinho (opção 1) para negociar as cargas que ficaram fora de serviço. Caso o agente alimentador vizinho (opção 1) não tiver condições de assumir todas as cargas, inicia-se uma negociação com o vizinho (opção 2) para transferir as cargas do alimentador vizinho (opção 1) para o outro alimentador vizinho (opção 2). Dessa forma, o alimentador (opção 1) pode ter condições de assumir as cargas fora de serviço.

Uma arquitetura da troca de mensagens entre os agentes está ilustrada na Figura 4.3, onde é possível verificar os tipos de mensagens entre cada agente.

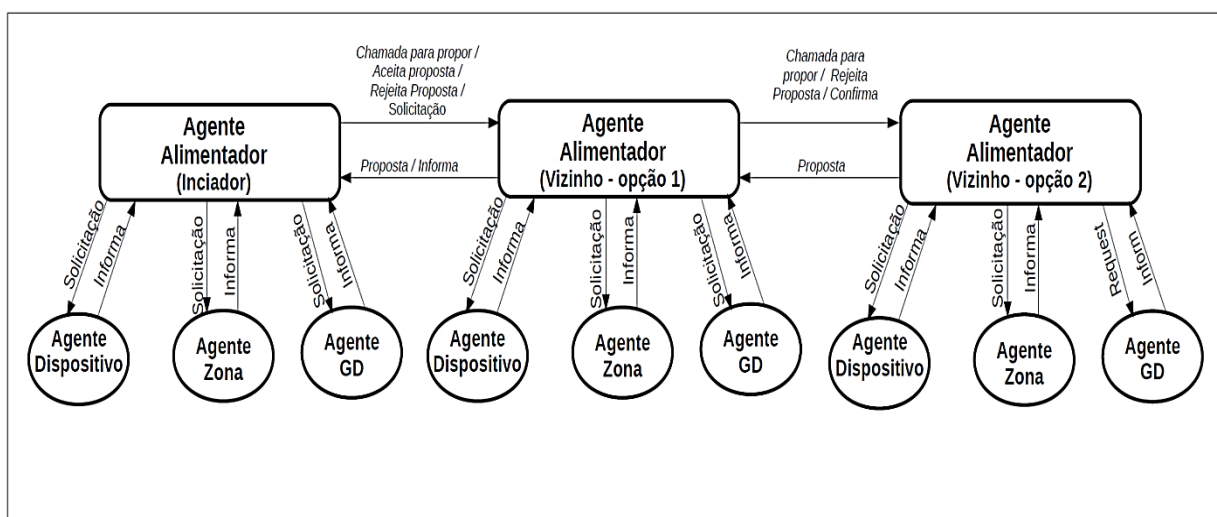


Figura 4.3 – Arquitetura de comunicação entre os agentes
Fonte: Adaptado de Zidan; El-Saadany (2012).

O desenvolvimento da arquitetura de sistema multiagente foi feita com a plataforma JADE. Dessa forma, a comunicação entre os agentes segue o padrão *FIPA*. A negociação entre os agentes alimentadores e a troca de mensagens entre eles são baseados no padrão *FIPA Contract Net*. Essa arquitetura de comunicação,

é baseada em comunicação descentralizada de duas vias (*two way*) (ZIDAN *et al.*, 2011), (KATO *et al.*, 2005), dessa maneira a troca de mensagens entre os agentes pode facilmente ser utilizada em qualquer meio de comunicação, podendo ser via rádio, fibra ótica, GPRS e PLC - *Power Line Communication*.

Na Figura 4.4, é apresentado um exemplo de rede elétrica de distribuição que servirá para explicar a arquitetura e estrutura de comunicação do sistema multiagente propostas nesta dissertação e a forma como estão distribuídas na rede de distribuição para isolar o defeito e recompor o sistema.

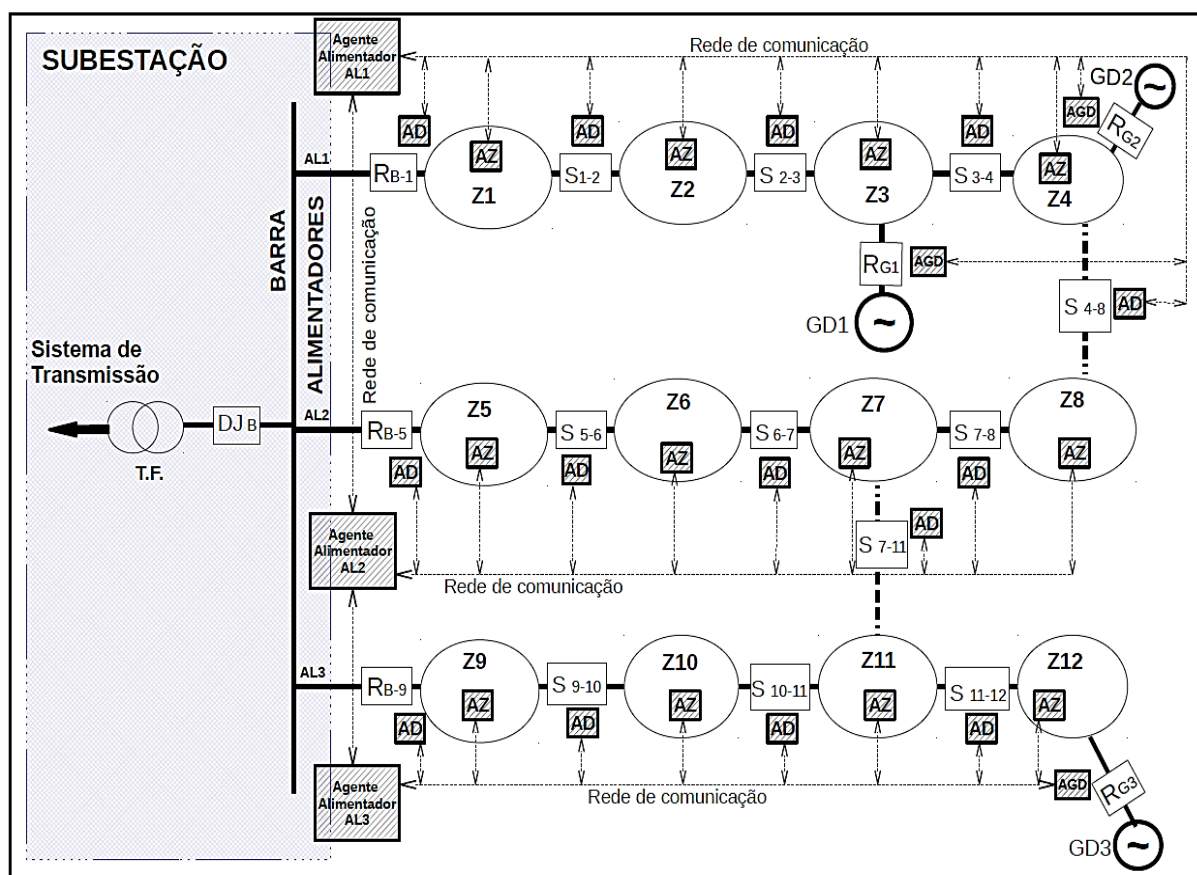


Figura 4.4 – Rede elétrica de distribuição exemplo, contendo a estrutura de comunicação e disposições dos equipamentos do sistema multiagente do modelo proposto.

Fonte: Adaptado de Zidan; El-Saadany (2012).

A Figura 4.4 mostra um sistema de rede de distribuição com três alimentadores conectados na mesma barra de uma subestação. Cada alimentador é dividido em áreas separadas por chaves, sendo tais áreas as camadas de zonas (KATO *et al.*, 2005). A estrutura da rede considera geradores distribuídos ao longo da rede conectados às zonas, sendo que as cargas também estão conectadas às

zonas. A estrutura de comunicação do sistema multiagente na rede de distribuição é representada de forma distribuída podendo ser qualquer tipo de meio que permita uma comunicação em duas vias. Os equipamentos instalados ao longo dos alimentadores podem ser religadores automáticos e chaves automatizadas, podendo ou não estar no modo função seccionalizador e dispositivos especiais, como religadores que possuem a tecnologia de *Pulseclosing*. Nesse exemplo, os religadores estão representados na saída da subestação, por exemplo, o R_{B-1} é o religador do alimentador 1, que está localizado entre a barra da subestação e a zona 1. O DJ_B é o disjuntor geral de barra da subestação. Na rede de distribuição mostrada no exemplo da Figura 4.4, os equipamentos com sigla S podem ser chaves automatizadas ou religadores automáticos, com possibilidade de trabalhar em modo chave. Esses equipamentos realizam manobras na rede de distribuição, sendo que todas as chaves automáticas estão normalmente fechadas, exceto as S_{4-8} e a S_{7-11} , que são chaves normalmente abertas que possibilitam a interligação de circuito entre alimentadores. Por fim, os R_G são os religadores com função de disjuntor dos geradores distribuídos ao longo do alimentador. Na presente dissertação, assume-se que todos esses equipamentos de manobra representados possuem outros equipamentos eletrônicos embarcados que lhe dão certo grau de “inteligência” capaz de realizar as funções de proteção de sobrecorrente e de direcional de corrente, como religadores, seccionalizadores e chaves com comando remoto. Os equipamentos também podem possuir IEDs ou UTRs com capacidade de comunicação e integração dentro do contexto das redes elétricas inteligentes.

4.3 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO ALGORITMO

O processo de restauração é baseado em alguns critérios, que através das restrições impostas no problema permitem que as cargas sejam restauradas de forma segura, começando pelos clientes prioritários, de modo a não prejudicar os padrões de qualidade do suprimento de energia e das possíveis fontes capazes de energizar alimentadores.

4.3.1 Restrições da rede de distribuição

Durante todo o período de restauração da rede são consideradas as restrições descritas da seguinte forma (ZIDAN; EL-SAADANY, 2012) (KUMAR *et al.*, 2008):

1. Rede de distribuição sempre radial;
2. As correntes de todos os ramos do alimentador e da barra da subestação dentro dos limites:

$$I_k \leq I_{m\acute{a}x} \quad (4.1)$$

onde, I_k é a corrente no ramo/barra da subestação k , e $I_{m\acute{a}x}$: corrente máxima de linha/do transformador da subestação.

3. As tensões das barras dentro dos limites:

$$V_{m\acute{i}n} \leq V_k \leq V_{m\acute{a}x} \quad (4.2)$$

onde, V_k é a tensão no k barramento, e $V_{m\acute{a}x}$, $V_{m\acute{i}n}$ são as tensões máximas e mínimas aceitáveis nas barras de carga.

4.3.2 Identificação e Isolamento da Falha Utilizando Esquema de Proteção

Nesta proposta assume-se que a localização da falha na rede de distribuição é realizada pelos agentes dispositivo. Esses identificam em qual zona está a falha. A identificação da falha ocorre na primeira etapa do algoritmo mostrado na Figura 4.1 e está descrita a seguir:

4.3.2.1 1ª Etapa - Identificação e Isolamento da Falha

Nesta etapa, após a ocorrência de uma falta na rede de distribuição inicia-se o processo de localização e isolamento da falta. Para que o processo de isolamento da falta seja realizado com sucesso, esse depende do funcionamento dos dispositivos

de proteção instalados ao longo da rede e da comunicação entre os agentes dispositivo (KATO *et al.*, 2005). Descreve-se a sequência em três passos:

1. Quando ocorre uma falta na rede de distribuição, o dispositivo de proteção irá atuar até ir a bloqueio, caso a falta seja permanente, deixando o trecho e as cargas fora de serviço;
2. Em seguida os agentes dispositivo recebem as informações dos IEDs sobre o curto e em seguida enviam uma mensagem para todos os agentes dispositivo da mesma zona informando a identificação. Assim que esses agentes recebem a mensagem, eles realizam a abertura das suas chaves isolando a zona;
3. Após a confirmação da abertura, o agente dispositivo envia uma mensagem ao agente alimentador identificando a zona em que se encontra a falta;

Na ocorrência da falta, as funções de proteção irão atuar nos IEDs. Se a falta é permanente, o religador irá religar até número de tentativas programado no relé indo a bloqueio. Após o bloqueio do relé, os agentes dispositivo identificam os sinais de sobrecorrente, direcional e falta de tensão, e em seguida iniciam o processo de identificação da falta. No processo de identificação da falta, os agentes dispositivo identificam e localizam a falta, com as informações disponibilizadas pelos IEDs. Após a identificação da falta as chaves adjacentes à zona que ocorreu a falta são abertas para isolar o defeito.

A metodologia proposta nesta dissertação também considera que as zonas podem possuir geração distribuída. É importante que o sistema tenha condições de identificar uma falta considerando geração, pois, quando inseridas unidades de GD, o fluxo de atuação da corrente pode mudar o sentido de unidirecional para bidirecional (ZIDAN; EL-SAADANY, 2012), (KATO *et al.*, 2005). Para a detecção e localização da falta através dos agentes dispositivo, são considerados os dados dos IEDs instalados na rede de distribuição, porém é necessário um esquema lógico para que o defeito seja identificado de forma correta, isso devido às contribuições de corrente de curto-circuito quando se tem geração distribuída conectada no alimentador. O agente dispositivo observa o fluxo de corrente de curto-circuito (I_{cc}) e sua localização. Quando ocorre uma falha em qualquer lugar do sistema de distribuição, ocorre uma mudança na direção dos fluxos de corrente e na sua magnitude. Em seguida, os agentes dispositivo localizados próximos ao ponto da

falta fornecem três tipos de sinais usando um relé direcional (função 67), um relé de sobrecorrente (função 50) e a abertura do equipamento. As informações de tempo em que foram criados não estão sendo consideradas. Os sinais indicam apenas o estado do fluxo de corrente que foi alterado (KATO *et al.*, 2005). Na Figura 4.5 é mostrada a estrutura de um agente dispositivo. Ela demonstra como o agente identifica as zonas. O agente dispositivo monitora as duas zonas adjacentes (X e Y) e possui interface de comunicação com os IEDs e comunicação com o agente alimentador.

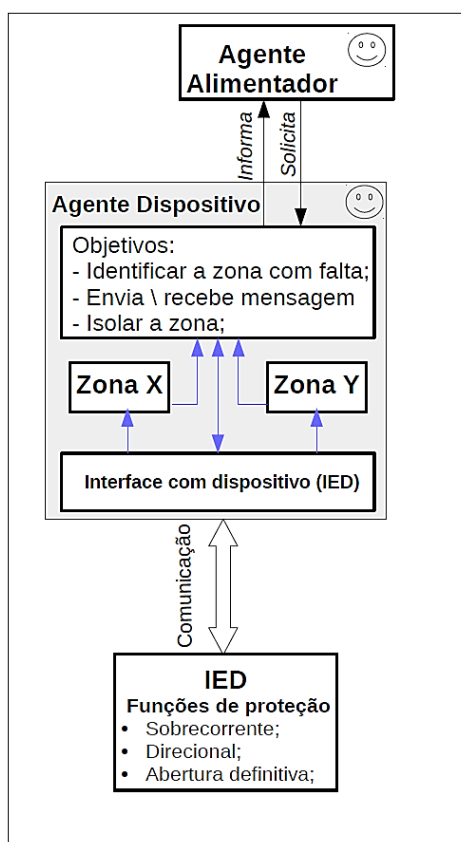


Figura 4.5 – Estrutura do Agente Dispositivo.
Fonte: O autor, 2015.

No caso em que os equipamentos instalados na rede são religadores com a função modo chave sem atuação de proteção, os agentes dispositivo recebem os sinais de estado dos IEDs simultaneamente. Todos os sinais de estado entram em um circuito lógico, para processar um sinal de disparo para a sua própria chave ser aberta. No entanto, para concretizar a abertura, é necessário um sinal do agente alimentador, pois as aberturas das chaves somente poderão ocorrer após o relé de proteção ter realizado os religamentos (função ANSI 79) e ter ido a bloqueio. Por

exemplo, na ocorrência de uma falta na zona Z2, os agentes dispositivo recebem informação das chaves S_{1-2} e S_{2-3} , desse modo, através de uma lógica booleana com sinais recebidos das chaves, é possível localizar a falta. Nesse caso, como o circuito possui geração distribuída, os agentes necessitam ter a capacidade de localizar a falta, pois, devido à característica do circuito com geração distribuída, no instante da falta pode existir a contribuição dos geradores conectados à rede, mesmo que seja por um determinado instante de tempo, em um sistema convencional de localização de falta na rede de distribuição é passível de erro na localização. Nos agentes a contribuição das correntes de curto-circuito (I_{cc}) é identificada através de uma lógica específica. A Figura 4.6 ilustra uma falta ocorrida na zona 2 e a representação das contribuições de corrente de curto-circuito quando se tem geração distribuída conectada no alimentador.

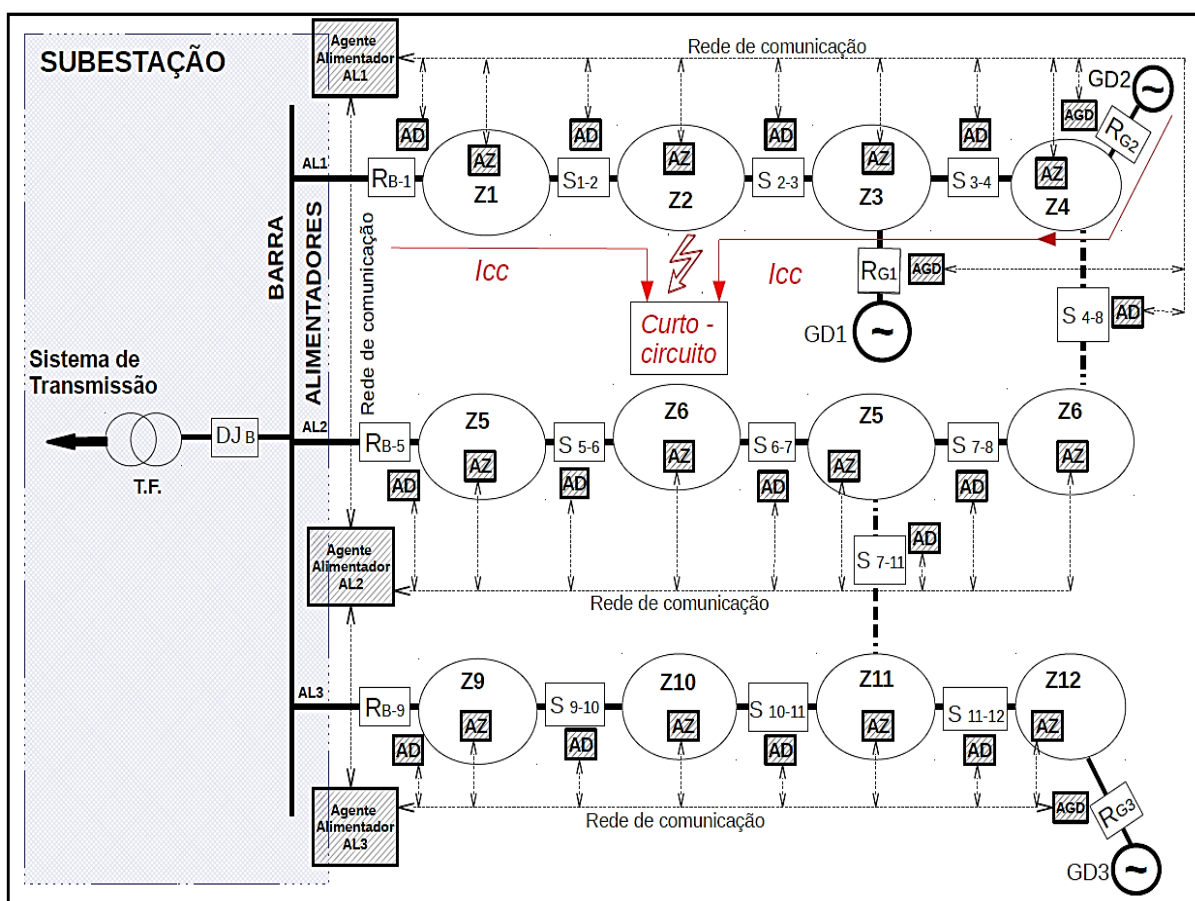


Figura 4.6 – Exemplo de rede elétrica de distribuição com curto circuito na zona 2
Fonte: Adaptado de Zidan; El-Saadany (2012).

A Figura 4.7 mostra a rede de troca de informações utilizada pelos agentes dispositivo. Assim que a falta é identificada, os agentes dispositivo utilizam das

informações dos IEDs, para informar o agente alimentador através de uma mensagem *Inform* após a ocorrência de um curto-circuito. A indicação da falta (I_{1-2} , I_{2-3}) e o valor lógico do direcional do fluxo de corrente dos IEDs gera a localização da falta para o agentes dispositivo que estão na respectiva zona da falta. Esses sinais alimentam a Zona 1 e Zona 2, e essas são compostas pelas estruturas lógicas mostrada na Figura 4.8. Com essa lógica não existe problema para identificação da zona se o alimentador possui ou não geração distribuída.

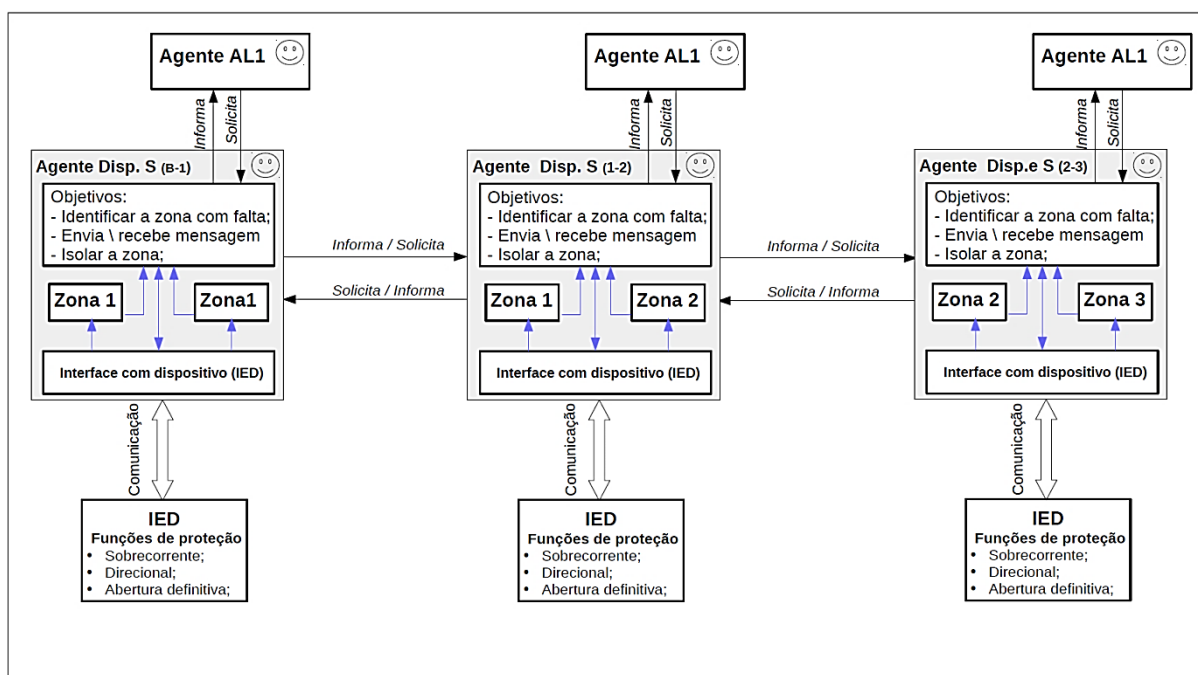


Figura 4.7 – Estrutura de comunicação entre agentes dispositivo
Fonte O autor, 2015.

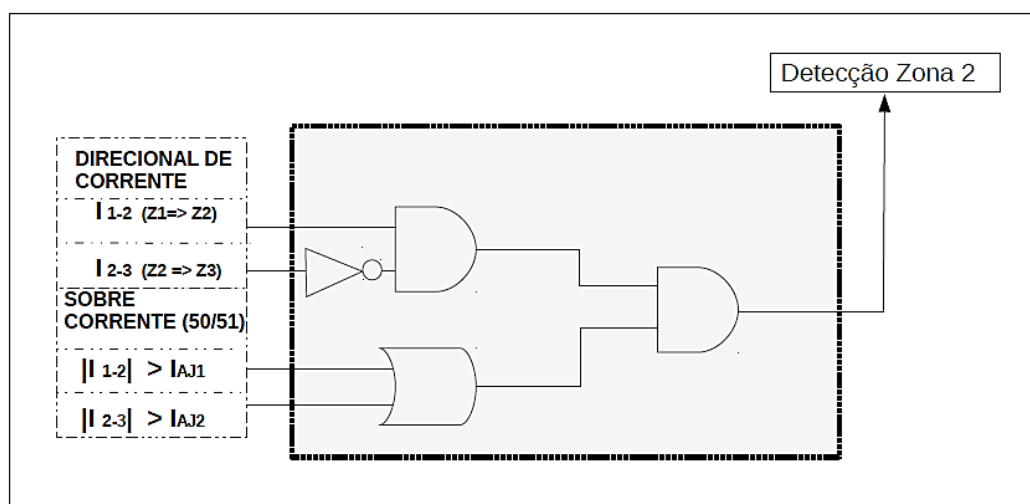


Figura 4.8 – Estrutura lógica para detecção de zona
Fonte: Adaptada de Kato *et al.* (2005)

Assim que o agente dispositivo S₂₋₁ identifica a zona 2, ele envia uma mensagem do tipo *request* para os agentes dispositivo que estão conectados na mesma zona, neste caso o S₂₋₃, afim de solicitar a abertura das chaves S₂₋₃ e S₂₋₁. Desta maneira, a zona 2 fica isolada. Quando o agente dispositivo recebe as mensagens de confirmação de abertura das chaves, ele envia uma mensagem ao agente alimentador informando a zona com defeito.

Assim que o agente alimentador (AAL1) recebe as informações dos agentes dispositivo informando a zona com defeito, o agente alimentador (AAL1) envia uma mensagem *request* para os agentes zona, solicitando seu status e a sua demanda, e inicia o processo de negociação com outros agentes alimentadores para energizar as zonas que ficaram fora de serviço, que neste caso são as zonas Z3, e Z4.

No caso, por exemplo, da falta ser na zona Z6, no circuito do alimentador (AAL2) que não possui geração distribuída, o processo é o mesmo: os agentes dispositivo que irão localizar e isolar a falta serão a S₅₋₆, S₆₋₇, mesmo que o fluxo de corrente seja unidirecional, isso devido à lógica implementada nos agentes. Do mesmo modo, o agente dispositivo utiliza as informações fornecidas pelos dispositivos para informar o agente alimentador (AAL2) através de uma mensagem *Inform*. A indicação da falta (*I₅₋₆*) dos dispositivos e o valor lógico informado pela função direcional do relé (função ANSI 67) orienta o agente dispositivo na localização da falta. Assim que o agente dispositivo S₅₋₆ identifica a zona 6, envia uma mensagem do tipo *request* para os agentes dispositivo que estão conectados na mesma zona, neste caso o S₆₋₇, e solicita a abertura das chaves S₅₋₆ e S₆₋₇. Dessa forma, a zona 6 fica isolada. Quando o agente dispositivo recebe a mensagem de confirmação de abertura das chaves, ele envia uma mensagem ao agente alimentador informando a zona com defeito.

Assim que o agente alimentador (AAL2) recebe as informações dos agentes dispositivo informando a zona com defeito, o agente alimentador (AAL2) envia uma mensagem *request* para os agentes zona, solicitando seu status e a sua demanda, e inicia o processo de negociação com outros agentes alimentadores para energizar as zonas que ficaram fora de serviço, que, neste caso, são as zonas Z7 e Z8. A Figura 4.9 ilustra um exemplo de falta ocorrida na zona 6 e uma estrutura de comunicação já apresentada anteriormente na Figura 4.4.

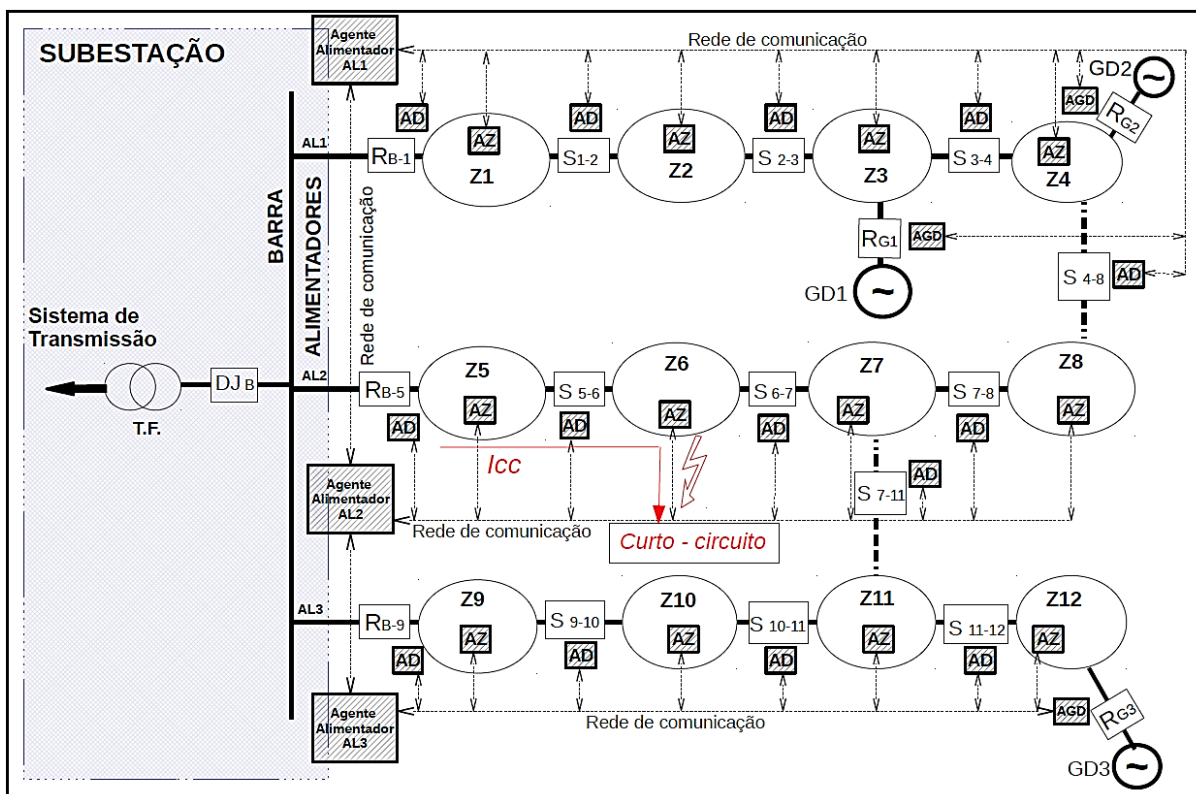


Figura 4.9 – Exemplo de rede elétrica de distribuição mostrando da estrutura de comunicação e disposições dos equipamentos do modelo proposto, com curto circuito na zona 6.

Fonte: Adaptado de Zidan; El-Saadany (2012).

O fluxograma geral da metodologia proposta para isolar o defeito ocorrido na rede de distribuição é mostrado na Figura 4.10.

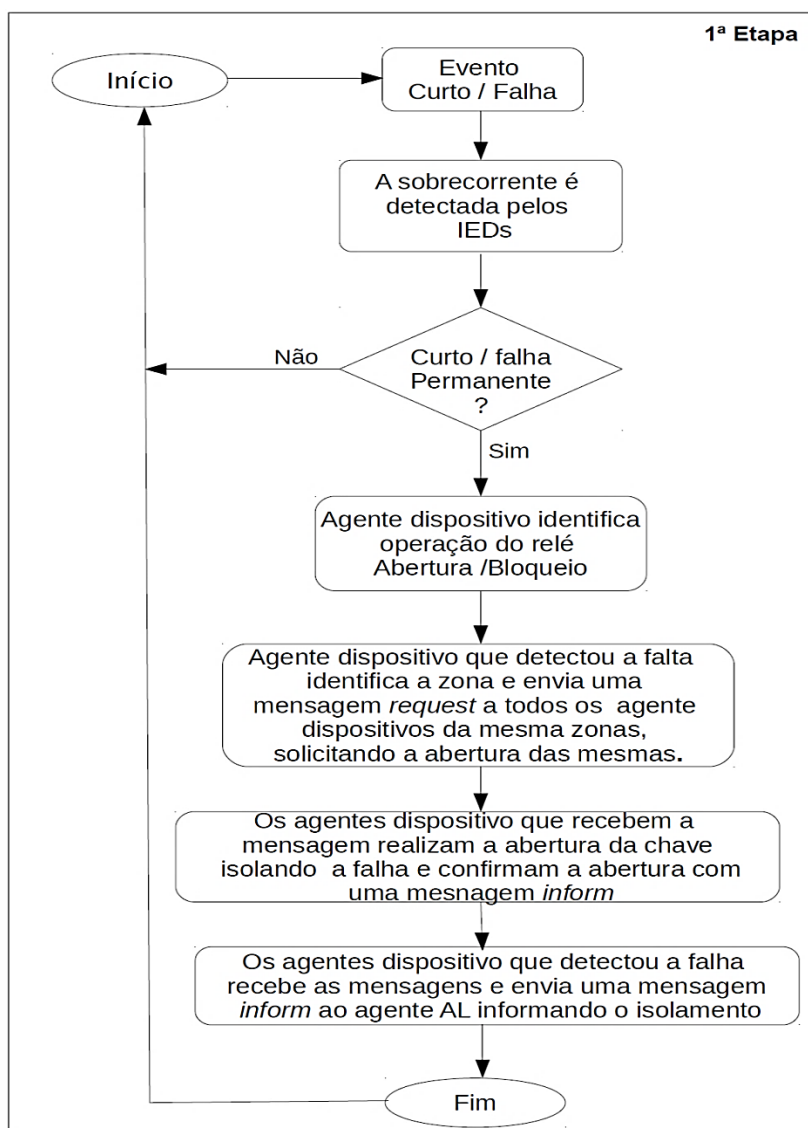


Figura 4.10 – Fluxograma do processo identificação e isolar falha
Fonte: O autor, 2015.

4.3.3 Restauração da Rede de Distribuição

O reestabelecimento das cargas é iniciado a partir da segunda etapa da metodologia proposta utilizando sistemas multiagente, que está ilustrado na Figura 3.1. A restauração automática de uma rede de distribuição é um problema de combinação de múltipla escolha, sendo assim, restaurar as cargas que estão fora de serviço pode se tornar um problema complexo (TALESKI; RAJICID, 1997).

O objetivo principal da metodologia é cumprir uma sequência de procedimentos que de nenhuma maneira violem as restrições impostas pelo sistema

da rede de distribuição (ZIDAN; EL-SAADANY, 2012). Essas sequências garantem as seguintes ações a partir da segunda etapa do algoritmo que estão descritas na seção a seguir.

4.3.3.1 2ª Etapa – Recuperação com um chaveamento

Após a conclusão da primeira etapa, é iniciado o processo de autorrecuperação. O método tenta recuperar todas as cargas que ficaram fora de serviço, caso não haja possibilidade, devido a alguma restrição do sistema, finaliza-se esta etapa e passa-se para a seguinte, caso contrário finaliza todo o processo de autorrecuperação. A seguir são apresentados os passos desta etapa:

1. O agente alimentador (AAL) identifica quais zonas estão fora de serviço, envia uma mensagem *request* às zonas solicitando o status e sua demanda, que é a somatória das cargas em cada uma das zonas. Junto com esse dado também recebe o nível de prioridades das cargas. A formulação desses dados são representadas abaixo:
 - a. Zonas fora de serviço:

$$Zoff_j = Zona_{jk} * x_j \quad k=1, \dots, n \quad (4.3)$$

onde: $Zona_{jk}$ é a respectiva zona, e x_j é o status da zona que pode ser um valor binário, 0 para zona em serviço ou 1 para zona fora de serviço, k é o número da zona, n é número total de zonas e j corresponde a posição dos vetores.

- b. Somatória das demandas das cargas na k -ésima zona:

$$S_k = \sum_{i=1}^{nL} S_k^i \quad (4.4)$$

onde, S_k^i : demanda de carga do consumidor (i), na respectiva zona (k), e nL : número total de consumidores na zona (k).

- c. As prioridades Pr_k^i de cada carga (i) em sua respectiva zona (k).

2. A negociação é iniciada com os alimentadores vizinhos, tentando restaurar todas as zonas fora de serviço. O agente alimentador (iniciador) envia uma mensagem *CFP (Call For Proposal)* de chamada de proposta para os alimentadores vizinhos (*responders de nível 1*) mais próximos. Essa mensagem possui a demanda de carga das zonas fora de serviço (TSAI; PAN, 2011). A formulação das demandas e zonas fora de serviço são apresentadas nas equações (4.3) e (4.4) deste capítulo;
3. Os agentes alimentadores (opção 2) enviam uma mensagem com uma proposta ao agente alimentador (opção 1). Na proposta estão inclusas as capacidades disponíveis (CDA - Capacidade Disponível do Alimentador) de cada alimentador (*responder*) para assumir as cargas fora de serviço.
4. O agente Alimentador (opção 1) classifica o alimentador o vizinho mais próximo pelo critério de maior disponibilidade (CDA) de fornecimento para assumir as cargas e através de uma comparação simples, o agente alimentador (opção 1) verifica se é possível restaurar todas as cargas com um único chaveamento (ZIDAN, 2013).

$$CDA_{\substack{m\acute{a}x \\ k \in \bar{Al} V1}} \geq \sum_{k=1}^{nz} S_k \quad (4.5)$$

onde: $CDA_{m\acute{a}x}$ é capacidade máxima disponível do alimentador S_k é demanda de carga de cada consumidor, na respectiva zona (k) e nz é o número de zonas.

5. Caso as condições do item anterior sejam satisfeitas, o agente alimentador (opção 1) envia uma mensagem *accept-proposal* ao agente alimentador vizinho (opção 1) que logo envia uma mensagem ao agente dispositivo de interligação (*tie*) para fechar a chave e finaliza o processo de auto recuperação. Caso contrário passa para terceira etapa.

Logo, o fluxograma que corresponde aos passos da segunda etapa é mostrado na Figura 4.11:

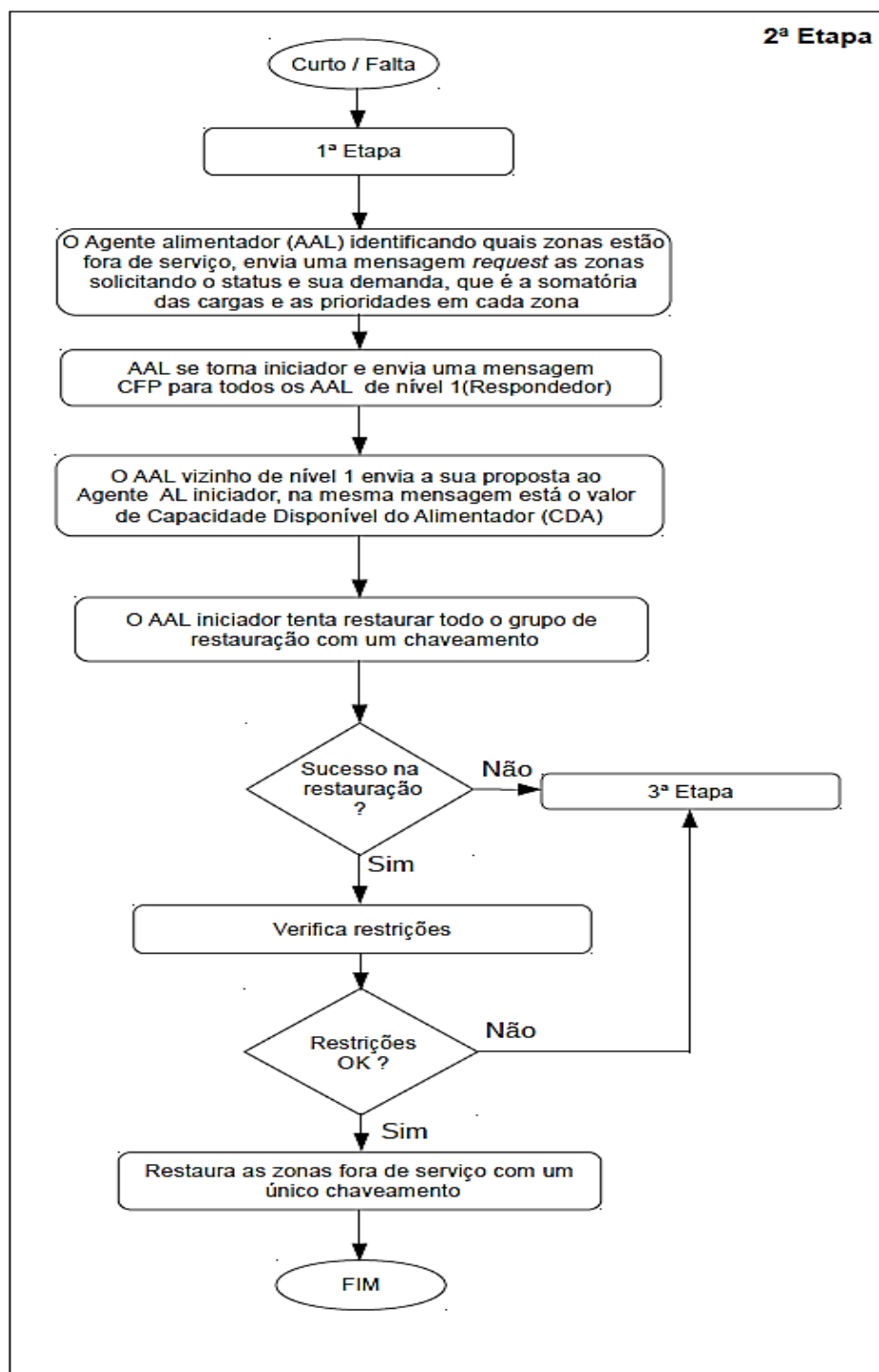


Figura 4.11 – Fluxograma da segunda etapa do processo de restauração
Fonte: Adaptado de Zidan; El-Saadany (2012).

4.3.3.2 3ª Etapa – Recuperação utilizando a tabela de combinações

A execução desta etapa somente é realizada caso a etapa anterior não tenha sido bem sucedida. Reinicia-se o processo de autorrecuperação de forma a construir uma tabela de combinações de chaves, zonas e demanda das cargas com suas prioridades para tentativas de restauração das cargas (TSAI; PAN, 2011), (ZIDAN; EL-SAADANY, 2012). Nesta etapa do processo o agente alimentador (iniciador) responsável pela negociação constrói uma tabela com as combinações possíveis de todas as zonas fora de serviço. A fim de efetivar uma restauração com os alimentadores vizinhos (opção1), o agente alimentador continua o processo de negociação com todos os alimentadores vizinhos. Assim que cada combinação é escolhida, o agente alimentador responsável pela negociação atualiza a tabela e verifica se a tabela está vazia. Caso não esteja, o agente continua a negociação até que a tabela esteja vazia. Porém, pode acontecer de não haver mais alternativas de restauração e a tabela não se esvaziar. Isso acontece quando o agente alimentador rejeita a proposta enviando uma mensagem do tipo *reject proposal* ao agente AL (opção 1). Para resolver o problema e continuar a esvaziar a tabela, o agente alimentador envia uma mensagem do tipo *request* ao agente alimentador (opção 1) solicitando que subcontrate outro alimentador para assumir as combinações restantes na tabela. O subcontrato é outro processo de negociação que depende do aceite do agente iniciador do processo. Caso a negociação seja aceita, então o agente alimentador vizinho (opção 1) transfere as cargas para o alimentador vizinho 2 (opção 2) e, em seguida, o agente alimentador vizinho (opção 1) assume as cargas restantes da tabela. Caso o AAL (iniciador) rejeite a proposta, finaliza-se esta etapa e passa-se para a próxima etapa, caso contrário finaliza-se o processo de autorrecuperação.

O agente alimentador (iniciador) inicia a construção de uma tabela de relacionamentos entre chaves, zonas e demanda em oito passos:

1. Passo 1: Identifica e monta uma tabela com a combinações possíveis de todas as zonas fora de serviço e suas demandas com suas prioridades. O número total de combinações pode ser expresso da seguinte forma (TSAI; PAN, 2011) :

$$Z_{R_k} = \sum_{j=1}^n C_j \quad (4.6)$$

onde, C é o conjunto de combinação das zonas, n é o número de conjuntos e j a respectiva zona.

2. Passo 2: A partir da tabela de combinações a metodologia constrói uma tabela de relacionamentos de chaves, zonas e demanda:

$$Z_R = \left\{ Z_{R_k} = \bigcup_{i=1}^K Z_{off} \right\} \quad k = 1, \dots, nz - 1 \quad (4.7)$$

Onde Z_{R_k} : é uma coleção de zonas adjacentes delimitadas por duas ou mais chaves, sendo que pelo menos uma das chaves é chave de interligação. Após os elementos na Z_R serem identificados o agente iniciador monta a tabela de relacionamento zona/chave.

A tabela contém colunas com as seguintes informações:

- a. A combinação de zonas Z_{R_k} ;
- b. As chaves delimitadas para cada combinação Z_{R_k} ;
- c. A demanda de carga S_{R_K} em cada combinação Z_{R_k} é composta por:

$$S_{R_K} = \sum_{i=1}^K S_i \quad (4.8)$$

- d. O índice de prioridade para cada combinação Z_{R_k} é dado pela formulação

$$S_{R \text{ índice}_K} = \sum_{i=1}^K Pr_k^i * S_k^i \quad (4.9)$$

onde, Pr é a prioridade de cada carga i , e k é numero de zonas

Baseado na tabela de relacionamento entre chaves, zonas e demanda, e nos CDAs enviados pelos os agentes vizinhos (opção 1), o agente iniciador busca por combinações de zonas para obter possíveis restaurações. O agente alimentador irá escolher a combinação de zonas com maior somatória de carga que o agente alimentador participante da negociação pode assumir. As restaurações consideram os critérios descritos no passo 3 para todas as zonas.

3. Passo 3: O agente alimentador iniciador, após receber todas as mensagens dos agentes alimentadores vizinhos (opção 1) escolhe o alimentador que tem maior CDA para comparar com a demanda das cargas fora de serviço $\sum S_k$ (somatória das cargas em cada grupo de zona).
 - a. O critério de comparação inicia-se com a escolha de carga S_k :

$$CDA_{\substack{k \in Al}}^{m\acute{a}x} \geq \sum_{k=1}^{nz} S_k \quad (4.10)$$

- b. Caso as cargas tenham valores iguais verifica-se o índice de prioridade das combinações em caso de valores de demanda iguais.

Após encontrar a combinação possível adequada na tabela, o agente iniciador realiza as ações descritas no passo 4.

- a. Passo 4: Enviar uma mensagem *accept-proposal* para os agentes vizinhos (opção 1) que serão usados na restauração;

- b. Colocar as chaves de interligação entre os agentes alimentadores que aceitaram a proposta e as combinações selecionadas para restauração em uma lista de chaves a serem fechadas (CF).
 - c. Colocar as chaves seccionadoras delimitadas das combinações selecionadas para a restauração em uma lista de chaves a serem abertas (CA) a fim de satisfazer a restrição radial;
4. Passo 5:
- a. Atualizar a tabela zonas, chaves.
 - b. Se a tabela não estiver vazia, retorna-se para o passo 2.
 - c. Caso após a atualização se verificar que a tabela está vazia, executa-se o passo 6.
5. Passo 6: Executam-se os chaveamentos da tabela de ações de chaveamento CF e CA, e então finaliza-se o processo de autorrecuperação.
- Caso ao retornar ao passo 2 e verificar que os vizinhos não tem condição de assumir as cargas então ir para o passo 7.
6. Passo 7: O agente iniciador envia uma mensagem *request* para o agente alimentador (opção 1) que são vizinhos das zonas restantes das combinações não restauradas. Esta *request* propõe aos agentes vizinhos AL (opção1) iniciar uma negociação com os agentes AL vizinhos (opção2) para verificar a possibilidade de transferências de carga para outro circuito vizinho conectado, afim de ter condições a assumir a carga do agente iniciador. A mensagem *request* inclui a CDA requerida para as zonas não restauradas nas combinações.
7. Passo 8: Atualiza a tabela e reinicia-se no passo 2 novamente. Se ainda caso ao retornar ao passo 2, verificar-se que os vizinhos não tem condição de assumir as cargas e/ou as restrições de tensão não forem aceitas então segue-se para quarta etapa.

Logo, o fluxograma que corresponde aos passos da terceira etapa é mostrado na Figura 4.12:

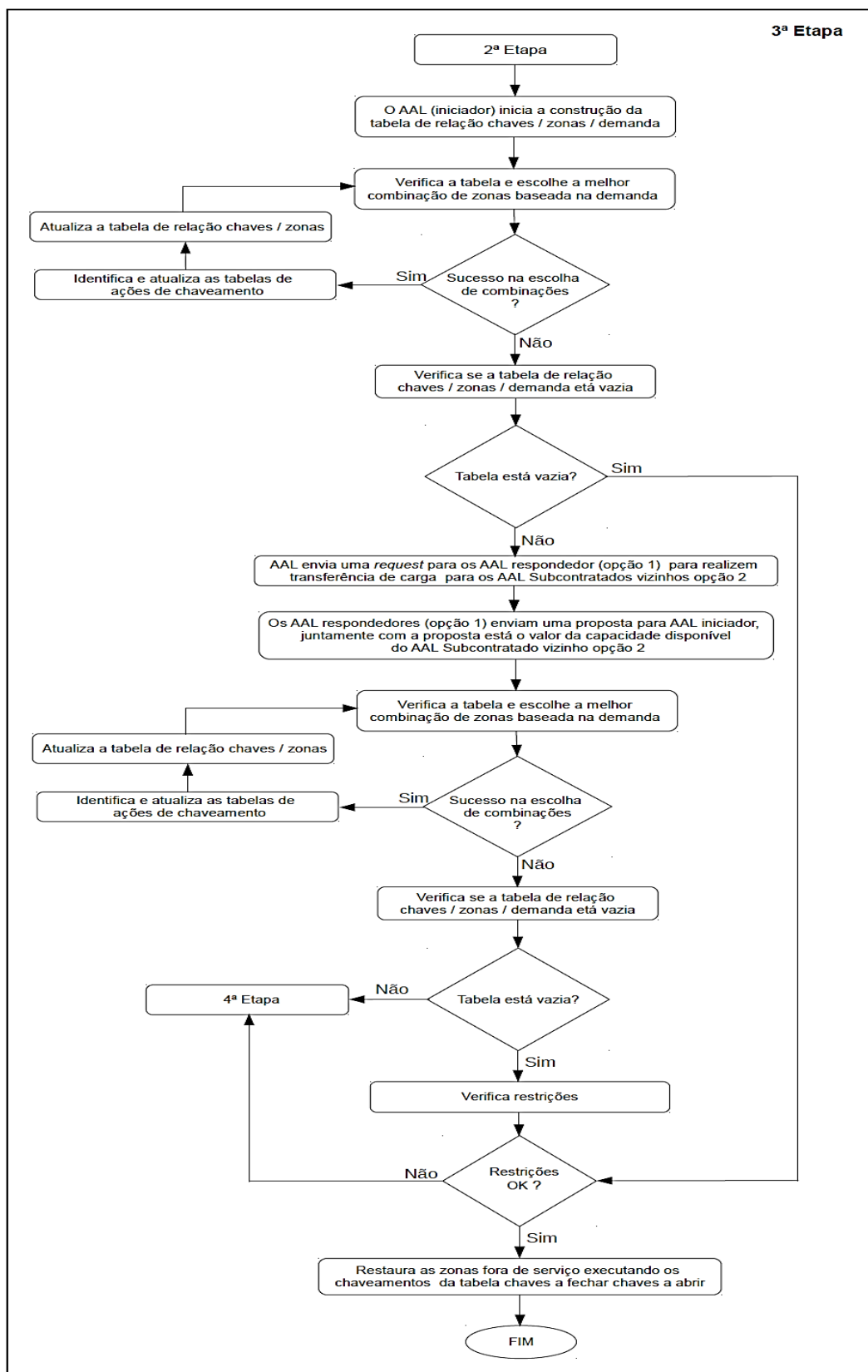


Figura 4.12 – Fluxograma da terceira etapa do processo de restauração
Fonte: Adaptado de Zidan; El-Saadany (2012)

Um exemplo da construção da tabela de combinações é mostrado a partir de um exemplo de uma rede de distribuição exibido na Figura 4.13. O exemplo mostra uma falta ocorrida na zona 1 do alimentador 2, supondo que os alimentadores 1 e 3 não possuem disponibilidade para assumirem todas as cargas fora de serviço do alimentador 2, inicia-se o montagem da tabela de combinações a partir da terceira etapa.

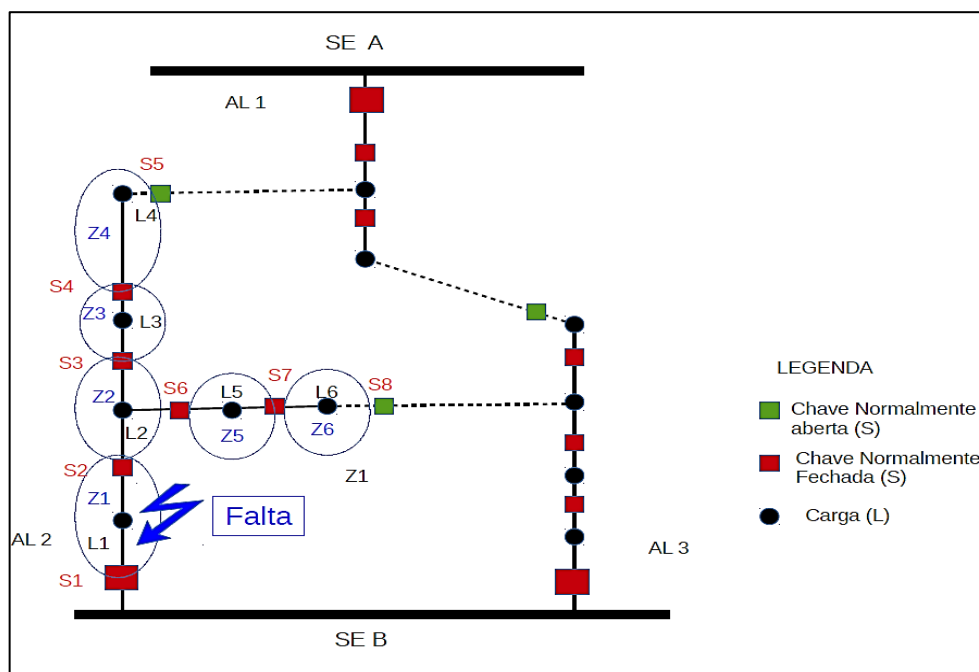


Figura 4.13 – Rede de distribuição exemplo
Fonte: O autor, 2015

Passo1: Identificação as zonas fora de serviço e montagem de uma tabela com as combinações possíveis de todas as zonas:

a) Identificação das zonas fora de serviço.

TABELA 4.1 – DADOS DAS ZONAS FORA DE SERVIÇO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO EXEMPLO

Carga (L)	Zonas fora de serviço	Sk(MVA)	Pr	SR índice k
2	Z2	0,015779	0,125	0,00197
3	Z3	0,019414	0,125	0,00243
4	Z4	0,060374	0,125	0,00755
5	Z5	0,050013	0,125	0,00625
6	Z6	0,074129	0,125	0,00927

Fonte: O autor, 2015.

Na identificação das zonas Z_{Rk} , foram realizadas as combinações de zonas possíveis para serem restauradas. As combinações das zonas são limitadas ao número total de zonas fora de serviço. Ou seja, o número de combinações de zonas (Z_{Rk}) é igual a zonas fora de serviço (Z_{off}). Nesse exemplo ficaram cinco zonas fora de serviço, na tabela são consideradas o total de combinações de zonas menos um ($Z_{R_{k-1}}$), ou seja, Z_{R_1} a Z_{R_4} , pois Z_{R_5} é composto por todas as zonas, visto que o algoritmo anteriormente já tentou restaurar o grupo formado por todas as zonas, e não foi possível, por isso Z_{R_5} é descartado.

b) Identificar as combinações possíveis para cada alimentador.

TABELA 4.2 – COMBINAÇÕES POSSÍVEIS DAS ZONAS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO EXEMPLO

Z_{Rk}	Zonas	
1	4	6
2	4, 3	6, 5
3	4, 3, 2	6, 5, 2
4	4, 3, 2, 5	6, 5, 2, 3

Fonte: O autor, 2015.

As combinações são por conexões nos alimentadores, neste caso, como são duas conexões possíveis, então são quatro combinações para cada conexão.

Passo 2: Construção da tabela de relacionamento chave/zona/demanda/Fator de prioridade:

TABELA 4.3 – TABELA DE COMBINAÇÕES DAS ZONAS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO EXEMPLO

Alimentador	Zona	Chaves	$\sum S_k$ (MVA)	SRK
AL 1	Z4	S5, S4	0,060374	0,0075
	Z4, Z3	S5, S3	0,079788	0,0100
	Z4, Z3, Z2	S5, S6	0,095567	0,0119
	Z4, Z3, Z2, Z5	S5, S7	0,145580	0,0182
AL3	Z6	S8, S7	0,074129	0,0093
	Z6, Z5	S8, S6	0,124141	0,0155
	Z6, Z5, Z2	S8, S3	0,139920	0,0175
	Z6, Z5, Z2, Z3	S8, S4	0,159334	0,0199

Fonte: O autor, 2015.

Dessa forma, baseado na tabela de relacionamento de zonas/chaves/demanda e os CDAs comunicados pelos os agentes Alimentadores (opção 1), o agente Alimentador iniciador busca por combinações possíveis de restauração de zonas.

4.3.3.3 4ª Etapa – Ilhamento intencional e corte seletivo de carga

Esta etapa somente se inicia caso a terceira etapa não obtiver sucesso na finalização. O agente atualiza a tabela de relacionamento e continua tentando a recuperação das cargas até que esteja vazia, caso as possibilidades acabem e a tabela não esteja vazia, finaliza-se a etapa anterior e inicia-se esta etapa (YOU *et al.*, 2002).

1. O agente alimentador (*iniciador*) verifica se existe geração distribuída (GD) em alguma das zonas fora de serviço. A verificação é feita através dos dados das mensagens recebidas das zonas conforme Equação (4.4). Caso este item não seja atendido passa-se para o corte seletivo de carga.
2. Verifica-se se as GDs das zonas têm condições de assumir a carga de toda a zona através de uma comparação simples:

$$S_{GD} \geq \sum_{k=1}^n S_k \quad (4.11)$$

3. Caso tenha, o agente alimentador (*iniciador*) envia uma mensagem *request* para abrir as chaves adjacentes à zona, enviando uma mensagem para que as chaves sejam bloqueadas para comando manual e automático, continuando com o passo 5.
4. Caso o item 2 não seja atendido, aplica-se o corte de carga na zona da geração distribuída, até que se chegue ao valor de disponibilidade da geração para as cargas.
5. O agente alimentador envia uma mensagem de *request* ao agente ou aos agentes GD para alimentar a zona ilhada.

Em seguida, nesta mesma etapa a metodologia realiza o corte de carga seletivo por prioridade (HUANG *et al.*, 2005). O algoritmo atualiza a tabela de relacionamento e continua tentando a recuperação das cargas, realizando o corte de carga e atualizando a tabela até que ela esteja vazia. Assim que a tabela estiver vazia, finaliza-se o processo de autorrecuperação.

1. O agente alimentador (iniciador) atualiza a tabela de combinações de zonas, chaves e demanda e segue uma sequência de seis passos:

Passo 1: Aplica o corte de carga no nível de prioridades das cargas nas zonas fora de serviço.

Passo 2: Atualiza a tabela combinações de zonas, chaves e demanda;

Passo 3: Escolhe o alimentador que tem maior CDA para comparar com a demanda do alimentador $\sum Z_{R_k}$ (soma das cargas em cada grupo de zona).

Depois de chegar à viabilidade das restaurações possíveis o agente iniciador realiza as ações:

Passo 4:

1. Enviar uma mensagem *accept-proposal* para os agentes AL (opção1) que serão usados na restauração;
2. Colocar as chaves de interligação entre os agentes alimentadores que aceitaram a proposta e as combinações selecionadas para restauração em uma lista de chaves a serem fechadas (CF).
3. Colocar as chaves seccionadoras delimitadas das combinações selecionadas para a restauração em uma lista de chaves a serem abertas (CA) a fim de satisfazer a restrição radial;

Passo 5: Atualiza a tabela zonas, chaves e demanda e verifica as restrições do sistema.

Se a tabela não estiver vazia, retorna para o passo 1 e aplica corte de carga em nível 2. E assim sucessivamente. Caso após a atualização se verificar que a tabela está vazia, executa-se o passo 6.

Passo 6: Executa os chaveamentos da tabela CF e CA, e então finaliza o processo de auto recuperação.

O fluxograma que corresponde aos passos da quarta etapa é mostrado na Figura 4.14:

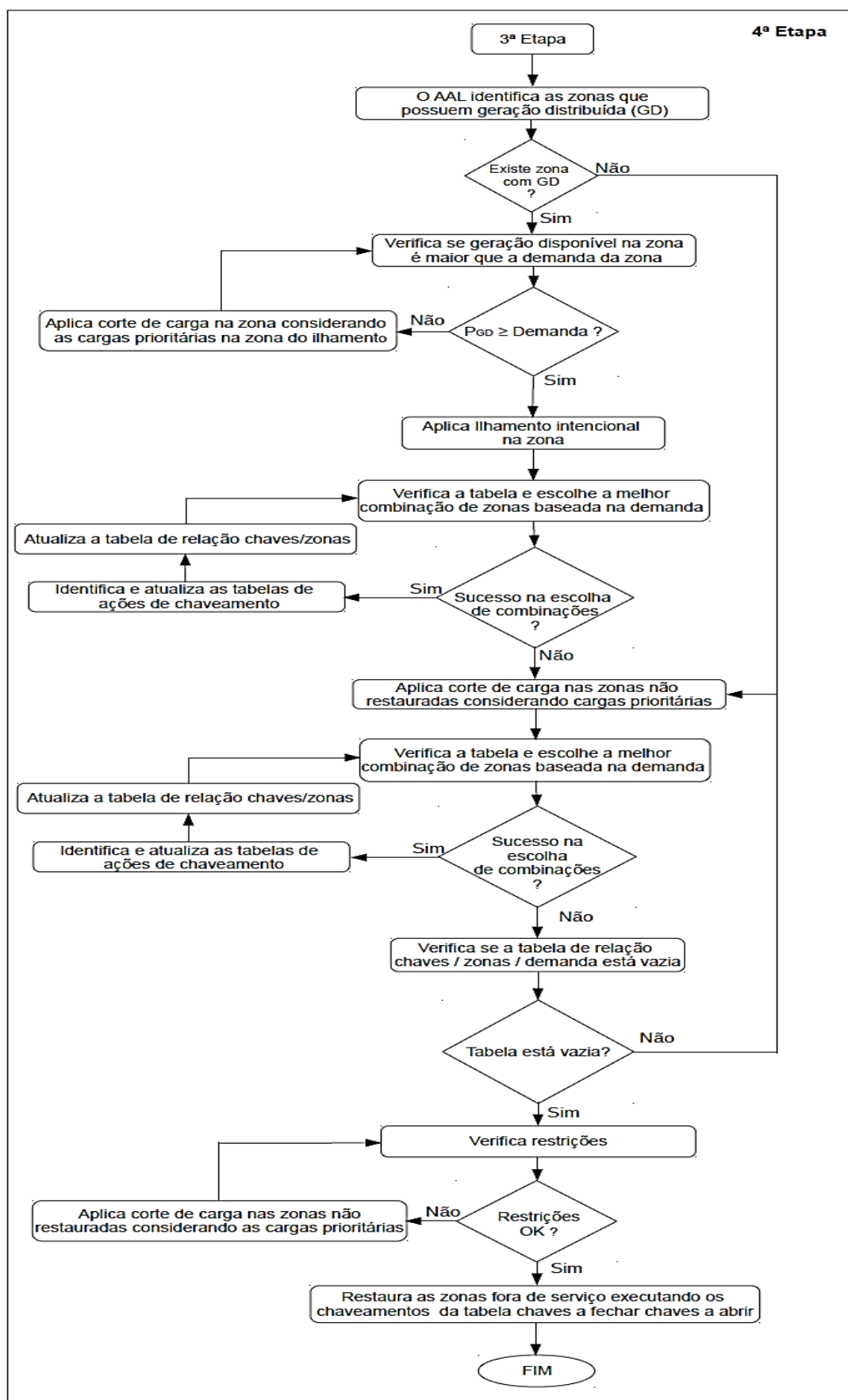


Figura 4.14 – Fluxograma da quarta etapa do processo de restauração
 Fonte: O autor, 2015.

As regras utilizadas para o corte seletivo de carga proposto neste trabalho são baseadas nos índices de prioridade dos consumidores. Neste trabalho foram considerados quatro níveis de prioridade para definir o grau de importância em cada classe de clientes (HUANG *et al.*, 2005):

- a. Nível 1: São clientes residenciais;
- b. Nível 2: São clientes comerciais, essenciais e que poderiam afetar de uma certa forma o público (escolas, supermercados, instalações desportivas e de entretenimento e etc.);
- c. Nível 3: São clientes industriais, importantes e que cuja falta de energia poderia resultar em sérios danos financeiros (bancos, refinarias de petróleo, plantas de alta tecnologia e etc.);
- d. Nível 4: São clientes públicos ou privados de suma importância, clientes que têm impacto direto ao público e que podem acarretar riscos à segurança e ao bem público (hospitais, delegacias, quartéis de bombeiros, sistemas de telecomunicações e etc.).

O critério ponderação para cada carga é o índice de prioridade SR. Cada carga possui seu índice que é calculado pela Equação (4.9). Após a localização e isolamento da falta, os agentes de zona enviam uma mensagem *request* com a somatória de suas cargas e suas respectivas prioridades Pr_k , conforme informado neste capítulo. A Tabela 4.4 apresenta os pesos de prioridade de cada tipo de carga.

Se o problema da sobrecarga e de restrição de tensão não podem ser resolvidos completamente após a transferência de carga de alimentadores principais para os alimentadores vizinhos, o corte de carga tem de ser executado para desligar o serviço de clientes menos importantes. Neste trabalho, quatro níveis de prioridade são usados para definir como é importante cada classe de clientes.

TABELA 4.4 – OS NÍVEIS E PESO DE PRIORIDADE

Nível de prioridade	Peso da prioridade - Pr
1	0,125
2	0,25
3	0,5
4	1

Fonte: Adaptada de Huang *et al.* (2005)

4.4 CÁLCULO DA CAPACIDADE DISPONÍVEL NO ALIMENTADOR – CDA

O cálculo de capacidade máxima é realizado em cada uma das etapas quando solicitado, conforme explicado nas seções anteriores. O agente alimentador iniciador envia uma mensagem *CFP* para todos os AAL vizinho opção 1, o AAL vizinho opção 1 envia a sua proposta ao AAL iniciador, na mesma mensagem está o valor de Capacidade Disponível do Alimentador (CDA) para o agente iniciador.

A. Alimentador vizinho opção 1

Para o cálculo do CDA, o agente vizinho opção 1 irá considerar os seguintes cálculos das variáveis da rede de distribuição:

1. Cálculo da margem disponível nos ramos (I_{MR}) e/ou a magnitude da corrente das barras:

$$I_{Rj} = I_{Máxj} - I_{Instj} \quad (4.12)$$

onde, $I_{Máxj}$ é a corrente máxima no ramo j ; I_{Instj} é a magnitude instantânea de corrente no ramo j

$$I_{MR} = \text{mín}(I_{Rj}) \quad (4.13)$$

2. O cálculo da margem disponível no alimentador (I_{MA}) considerando a impedância da rede a fim de atender a violação de tensão imposta nas restrições do sistema é calculada com a equação 4.5

$$I_{MA} = \frac{V_m - V_{min}}{Z_C} \quad (4.14)$$

onde, V_m é o valor mais baixo de magnitude de tensão da barra recebidos pelos agentes; V_{min} é o valor mínimo de magnitude de tensão da rede (neste caso 0.9 pu); Z_C é a somatória das impedâncias do caminho entre a subestação e o ponto de conexão da restauração do alimentador.

3. Cálculo da margem disponível no transformador da subestação que atende a barra (I_{MA}) em que os alimentadores estão ligados.

$$I_{MB} = I_{M\acute{a}x_T} - I_{InstT} \quad (4.15)$$

onde, $I_{M\acute{a}x_T}$ é a corrente máxima do transformador da subestação; I_{InstT} é a magnitude instantânea de corrente no transformador de força da subestação.

Por fim para o cálculo do CDA para assumir as cargas fora de serviço, são consideradas as seguintes formulações:

$$I_{CDA} = \text{mín}(I_{MR}, I_{MA}, I_{MB}) \quad (4.16)$$

A corrente I_{CDA} é o menor valor de corrente considerado para que o alimentador possa assumir as cargas fora de serviço. A equação 4.17 mostra como é calculado de fato o CDA de cada alimentador.

$$S_{CDA} = |V_{\text{mín}}| * |I_{CDA}| \quad (MVA) \quad (4.17)$$

$$CDA_{M\acute{a}x} = S_{CDA} \quad (MVA) \quad (4.18)$$

O cálculo compreende no produto do módulo da corrente encontrada I_{CDA} e o módulo do limite mínimo de tensão estipulado para rede de distribuição de energia. Esse cálculo estima a capacidade em MVA que o alimentador pode assumir cargas de outros alimentadores.

No critério de comparação, caso a capacidade máxima for menor que a demanda das zonas fora de serviço, ou seja, $CDA_{M\acute{a}x} < \sum_{k=1}^{nz} S_k$, o vizinho opção 1 (respondedor) inicia o processo de transferência de carga para o subcontratante vizinho opção 2.

Para saber quais as cargas a transferir, ou, neste caso, conhecer o melhor valor de transferência de carga é necessário calcular o CT (Cargas a serem

transferidas) , que seria a diferença entre as cargas S_K das combinações das zonas fora de serviço e o valor do $CDA_{Máx}$ informado pelo alimentador vizinho opção 1:

$$CT = S_K - CDA_{Máx} \quad (4.19)$$

Assim, o respondedor seleciona as suas zonas a serem transferidas para o alimentador do vizinho opção 2, achando o valor de T (valor de transferência de carga), como segue:

$$T = \text{mín} (CT, CDA_{Máx} \text{ do v. opção 2}) \quad (4.20)$$

Em seguida o novo CDA é recalculado e retorna para o passo 2 da 3ª etapa do algoritmo.

B. Alimentador vizinho opção 2

O agente vizinho opção 2 processa da mesma forma que o vizinho opção 1, considerando os seguintes cálculos das variáveis da rede de distribuição para que possa calcular:

1. Cálculo da margem disponível nos ramos e/ou a magnitude da tensão das barras, conforme a Equação 4.13;
2. O cálculo da margem disponível no alimentador considerando a impedância da rede a fim de atender a violação de tensão imposta nas restrições do sistema, conforme a Equação 4.14;
3. Cálculo da margem disponível no transformador da subestação que atende a barra em que os alimentadores estão ligados, conforme Equação 4.15.

Por fim, para o cálculo do CDA para restauração das cargas fora de serviço são consideradas as Equações 4.16, 4.17, e 4.18. Esse CDA garante que os limites de tensão das zonas restauradas não serão violados.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a metodologia proposta de um sistema computacional para resolver o problema de autorrecuperação baseada em sistema multiagente. Nesta proposta estão descritos o modelo e a estrutura de comunicação entre cada agente. O modelo é composto por quatro tipos de agentes: agente alimentador (AAL), agente zona (AZ), agente dispositivo (AD) e agente geração distribuída (AGD). O modelo apresentado foi dividido em quatro etapas, relatadas no subtítulo 4.3 deste capítulo.

No final deste capítulo, foram apresentados os cálculos referentes à execução da metodologia proposta e o cálculo referente à capacidade disponível nos alimentadores para assumirem as cargas de outro alimentador.

Para as simulações desta metodologia foram utilizados os software Matlab para modelagem e execução do fluxo de carga da rede de distribuição, e o Eclipse, no qual foi implementado o sistema multiagente sobre a plataforma JADE. Os dados e os resultados das simulações utilizados na metodologia proposta são apresentados no próximo capítulo.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta as simulações e os resultados de dois estudos de caso. Para realizar os experimentos foi necessário fazer uma interação entre os softwares Matlab (MATPOWER) e JADE. A interação é uma comunicação bidirecional entre os softwares realizada via *socket*, podendo estar no mesmo computador ou em computadores diferentes. O Matlab lê os dados de modelagem da rede de distribuição, executa um fluxo de carga gerando os valores de corrente, tensão e potência que é lido pelo JADE, permitindo que o sistema multiagente realize a captura dos dados e inicie o processo de recuperação das cargas fora de serviço.

Os resultados obtidos foram divididos em dois casos. O Caso I tem como objetivo comparar os resultados das simulações de um dos cenários apresentados em Zidan; E-Saadany, 2012, denominado aqui de Metodologia Base. Os resultados da Metodologia base são comparados com os resultados do Método Base Implementado e com os da Metodologia Proposta. O Método Base Implementado refere-se à reprodução do método apresentado em Zidan; E-Saadany, 2012. A Metodologia Proposta, refere-se à implementação da metodologia desenvolvida neste trabalho. Os resultados do Caso I são baseados em uma falta aplicada no trecho 52 do alimentador AL 4, como apresentado em Zidan; E-Saadany, 2012.

O Caso II compara os resultados da Metodologia Base Implementada com o Caso da Metodologia proposta neste trabalho aplicando uma falta o trecho 31 do alimentador AL3. Este tem como objetivo analisar e comparar os resultados de um ilhamento intencional na pós-reconfiguração.

Cada caso apresenta os resultados das simulações divididos em duas partes, a primeira simulação são os valores de pré-falta do sistema em que são considerados somente os dados antes de ocorrer a falta na rede de distribuição. Já a segunda simulação é baseada nos dados de pós-reconfiguração, ou seja, são os resultados obtidos após a reconfiguração do sistema. A Tabela 5.1 apresenta a relação dos casos.

TABELA 5.1 – RELAÇÃO DAS METODOLOGIAS A SEREM COMPARADAS

Metodologia Base	Zidan; E-Saadany, 2012 (Terceiro cenário)
Metodologia Base Implementada	Baseado em Zidan; E-Saadany, 2012 (Implementado pelo Autor, 2015)
Metodologia Proposta Implementada	Metodologia proposta aprimorada, baseado em Zidan; E-Saadany, 2012 (Implementado pelo Autor, 2015)

Fonte: O autor, 2015.

A diferença entre a Metodologia Base Implementada e a da Metodologia Proposta neste trabalho são apresentadas na Tabela 5.2. Basicamente a identificação e o isolamento da falta são realizados por agentes diferentes, o cálculo da capacidade do alimentador (CDA) na Metodologia Proposta considera a corrente máxima da barra da subestação. Isso devido à limitação da capacidade de potência do transformador da subestação, caso um ou mais alimentadores pertencentes a ela tenha assumido cargas de alimentadores de outras subestações.

O corte seletivo de carga da Metodologia Base é baseado na prioridade classificada por alimentadores. Os alimentadores AL1 e AL2 são classificados como alimentadores residenciais, o alimentador AL3 é classificado como alimentador industrial e o alimentador AL4 alimentador comercial. No entanto, no caso da Metodologia Implementada, a prioridade é classificada individualmente pelo tipo da carga. Embora o Autor da Metodologia Base tenha escrito que sua metodologia realiza o corte seletivo de carga, os resultados do mesmo não foram apresentados em seu trabalho.

O ilhamento foi incorporado à Metodologia Proposta Implementada neste trabalho como uma contribuição no processo de autorrecuperação das cargas fora de serviço. A Metodologia Base apresenta resultados sem considerar geração distribuída e resultados que consideram geração distribuída (GD), porém, os resultados que consideram GD não contemplam um modelo de ilhamento.

TABELA 5.2 – DIFERENÇA ENTRE A METODOLOGIA BASE E METODOLOGIA PROPOSTA IMPLEMENTADA

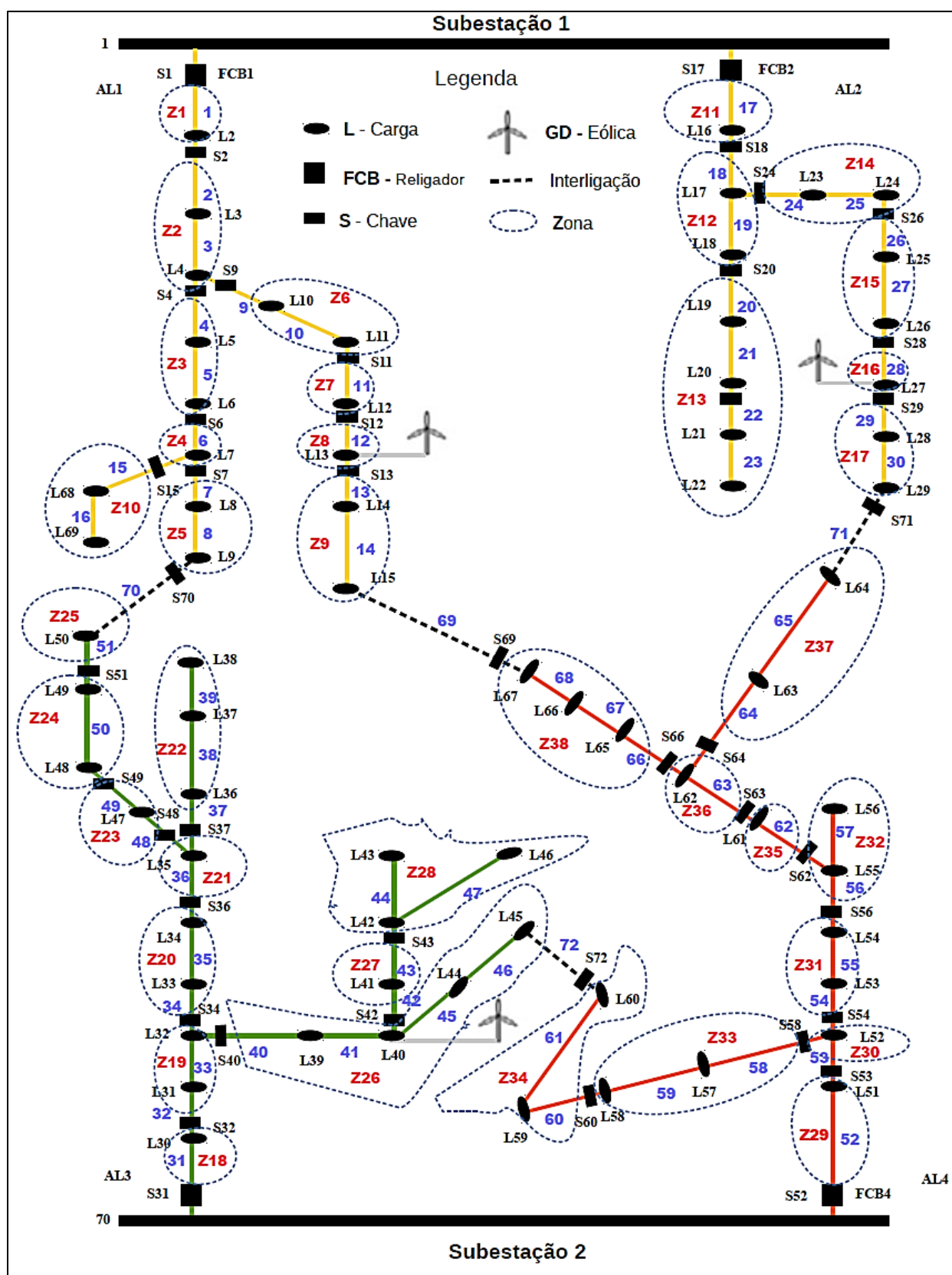
	Metodologia Base Implementada	Metodologia Proposta Implementada
Identifica e isola a falta	Agente Alimentador;	Agente Dispositivo;
Cálculo da capacidade do alimentador (CDA)	Considera queda de tensão, corrente de cada trecho;	Considera queda de tensão, corrente de cada trecho, corrente máxima da barra da subestação;
Corte seletivo de carga	Prioridade classificado por tipo de alimentador;	Prioridade classificado por tipo de carga;
Ilhamento	Não	Sim

Fonte: O autor, 2015.

Neste Caso I, os resultados dos casos são baseados na execução da primeira, segunda e terceira etapas da Metodologia proposta neste trabalho acrescentado do modelo de corte seletivo de carga.

5.1 CASO I – FALTA NO ALIMENTADOR 4 TRECHO 52

O caso I apresenta os resultados do Metodologia Base comparados com os resultados da simulação do Metodologia Base Implementada e da Metodologia Proposta Implementada neste trabalho. O ambiente de simulação é o mesmo utilizado pelo autor do Caso Base, foram realizadas modificações nas nomenclaturas e numeração dos trechos para melhor compreensão. Este ambiente de simulação é uma rede de distribuição radial composta por duas subestações, quatro alimentadores, que totalizam setenta barras e sessenta oito trechos. Os dados de carga, de geração, dos alimentadores, bem como os limites máximos e mínimos de tensão, potência e tensão de base são apresentados as Tabelas A.1, A.2, A.3 e A.4 do Apêndice A. Um fluxo de carga é realizado para gerar os valores de tensão e corrente em cada ponto de operação, conforme apresentado na Figura 5.1.



5.1.1 Resultados das simulações sem considerar geração distribuída

A Tabela 5.3 apresenta os valores de demanda da rede de distribuição na simulação de pré-falta e pós-reconfiguração para todas as metodologias. Os valores de pré-falta são referentes à demanda do sistema antes de ocorrer a falta e o valores de pós-reconfiguração que são os resultados após o reconfiguração da rede de distribuição. Os resultados do Metodologia Base são referentes ao terceiro cenário da simulação sem geração distribuída apresentado em Zidan; El-Saadany (2012). O cenário representa uma falta no trecho 52 do alimentador 4 no período crítico, ou seja, no horário de ponta da demanda, conforme apresentado na Tabela 5.3.

TABELA 5.3 – RESULTADOS DOS VALORES DE DEMANDA DO SISTEMA SEM GD: FALTA NO TRECHO 52

Simulação	Demanda do Sistema (MVA)
Pré-falta	4,886
Pós-reconfiguração	4,824

Fonte: O autor, 2015.

Após aplicar uma falta no trecho 51 do alimentador 4 as chaves S52 e S53 abriram isolando o defeito. Na Metodologia Base o agente alimentador, após receber a mensagem do agente zona que detecto a falta, retorna uma mensagem aos agentes zona que detectaram a falta para abrir as chaves adjacentes. No caso da Metodologia Implementada a identificação da falta é realizada pelos agentes Dispositivo (AD). Após detectarem a falta, os agentes Dispositivo através da troca de mensagens, identificaram o trecho de falta e isolaram a zona com a falta. Neste caso, a Tabela 5.4 apresenta a comparação entre os resultados da Metodologia Base, da Metodologia Base Implementada e da Metodologia Proposta Implementada. Comparando os resultados apresentados na Tabela 5.4, os dois casos realizaram a mesma ação da Metodologia Base, atingindo o objetivo, que é isolar o trecho onde ocorreu a falta, deixando a carga L51 isolada no trecho com defeito.

TABELA 5.4 – RESULTADOS REFERENTES A PRIMEIRA ETAPA DA METODOLOGIA: FALTA NO TRECHO 52 SEM GD

Metodologia	Falta Aplicada	Chaves isolam o trecho com defeito	Demanda do trecho isolado (MVA)	Zonas Isoladas	Zonas fora de serviço pós-falta	Demanda Total das Zonas Fora de serviço (MVA)
Base	Trecho 52	S52 e S53	L51:0,0648	Z29	Z30 a Z38	1,316
Base Implementada	Trecho 52	S52 e S53	L51:0,0648	Z29	Z30 a Z38	1,316
Proposta Implementada	Trecho 52	S52 e S53	L51:0,0648	Z29	Z30 a Z38	1,316

Fonte: O autor, 2015.

Após a falta ter sido isolada, inicia-se o processo de autorrecuperação das cargas que ficaram fora de serviço. A Tabela 5.5 apresenta a sequência do chaveamento dos três casos.

Como não foi possível a recuperação das cargas fora de serviço apenas com um chaveamento, foi necessário iniciar o processo de construção da tabela de combinações de zonas e chaves. Na Metodologia Proposta esta é a segunda etapa do processo.

Para recuperar as cargas tanto na Metodologia Base como na Metodologia Base Implementada foi realizada transferência de carga do alimentador AL1 para o alimentador AL3 com a abertura da chave S51 e o fechamento da S70. Assim, o alimentador AL1 assume parte das cargas fora de serviço do alimentador AL4 abrindo a chave S66 e fechando a S69 assumindo a zona Z38 do alimentador AL4. O alimentador AL2 também assume parte das cargas do alimentador 4, abrindo a chave S63 e fechando a chave S71. Dessa forma, o alimentador 3 tem condições de assumir o restante das cargas do alimentador 4 fechando a chave S72. A Metodologia Proposta neste trabalho para que as cargas do alimentador AL 4 sejam recuperadas em um menor tempo possível realiza o processo que se inicia abrindo a chave S63 e em seguida fechando a chave 72. As cargas da Z38 são atendidas pelo alimentador 1 com a abertura da chave S66 e o fechamento da chave S69 e as cargas da Z37 são atendidas pelo alimentador 2 com o fechamento da chave S721.

O número de chaveamentos foi exatamente igual entre a Metodologia Base e a Metodologia Base Implementada. Comparando com a Metodologia Implementada, o número de chaveamentos obteve uma redução de duas operações em relação à Metodologia Base e a Metodologia Base Implementada. O motivo dessa diferença é porque a Metodologia implementada identificou que não seria necessário a transferência de carga do alimentador AL1 para que o mesmo pudesse assumir as cargas do alimentador AL4. A diminuição no número de chaveamentos diminui o tempo de recuperação das cargas fora de serviço. Essa diferença também está ligada na metodologia de negociação das cargas entre os agentes alimentadores, pois depende da forma com que as prioridades das cargas foram classificadas.

TABELA 5.5 – SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO DA FALTA NO TRECHO 52 SEM GD

Sequência	Metodologia Base		Metodologia Base Implementada		Metodologia Proposta Implementada	
	Ações	Chaves	Ações	Chaves	Ações	Chaves
1	Abre	S51	Abre	S51	Abre	S63
2	Fecha	S70	Fecha	S70	Fecha	S72
3	Abre	S63	Abre	S63	Abre	S66
4	Abre	S66	Abre	S66	Fecha	S69
5	Fecha	S72	Fecha	S72	Fecha	S71
6	Fecha	S71	Fecha	S71	--	--
7	Fecha	S69	Fecha	S69	--	--

Fonte: O autor, 2015.

Os resultados de pré-falta de tensão mínima e perdas apresentados na Tabela 5.6, refere-se à Metodologia Base Implementada e da Metodologia Proposta Implementada, pois a Metodologia Base não apresenta os resultados de pré-falta do terceiro cenário. Os resultados de pós-reconfiguração são apresentados de forma individual com o objetivo de comparar os resultados.

Não houve diferença significativa nos resultados apresentados na Tabela 5.6, tanto os valores de tensão mínima e das perdas são semelhantes nos três casos.

TABELA 5.6 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PRÉ-FALTA E PÓS-RECONFIGURAÇÃO: FALTA NO TRECHO 52 SEM GD

		Pré-falta	Metodologia Base	Metodologia Base Implementada	Metodologia Proposta Implementada
			Pós-reconfiguração	Pós-reconfiguração	Pós-reconfiguração
Tensão (p.u.)	V_{min}	0,934	0,9071	0,9062	0,908
Perdas	MW	0,176	0,2626	0,2616	0,287
	Mvar	0,165	0,2297	0,2225	0,239

Fonte: O autor, 2015.

Não houve diferenças significativas entre as tensões mínimas dos três casos, e de igual forma as perdas. A pouca diferença é devido a diferença de chaveamentos e às casas decimais dos valores da carga. Esses resultados são parâmetros indicativos de que a implementação da Metodologia Base Implementada e da Metodologia Proposta estão de acordo com o esperado.

5.1.2 Resultados das simulações considerando geração distribuída

A Tabela 5.7 apresenta os valores de demanda da rede de distribuição na simulação de pré-falta e pós-reconfiguração para ambas as metodologias. Os valores de pré-falta são referentes à demanda do sistema antes de ocorrer a falta e o valores de pós-reconfiguração que são os resultados após o reconfiguração da rede de distribuição. O cenário representa uma falta no trecho 52 do alimentador 4 no período crítico, ou seja, no horário de ponta da demanda conforme apresentado na Tabela 5.7. A simulação também considera os valores de geração distribuída apresentados na Metodologia Base de 0,5 MW por cada unidade eólica geradora, conforme informado na Tabela 5.7.

Na geração distribuída não houve mudanças nos valores entre os resultados de pré-falta e pós-reconfiguração, pois as mesmas não estão localizadas em trechos de alimentadores que tiveram transferência de carga.

TABELA 5.7 – RESULTADOS DOS VALORES DE DEMANDA DO SISTEMA COM GD: FALTA NO TRECHO 52

Simulação	Demanda do Sistema (MVA)	DG (MW)
Pré-falta	4,886	1,5
Pós-reconfiguração	4,824	

Fonte: O autor, 2015.

Aplicada uma falta no trecho 51 do alimentador 4 as chaves S52 e S53 abriram para isolar o defeito. O agente alimentador, na Metodologia Base após receber a mensagem do agente zona que detectou a falta retorna uma mensagem aos agentes Zona que detectaram a falta para abrir as chaves adjacentes. No caso da Metodologia Proposta Implementada a identificação da falta é realizada pelos agentes Dispositivo (AD). Após detectarem a falta, os agentes Dispositivo através da troca de mensagens, identificaram o trecho de falta e isolaram a zona com a falta. Os resultados dos casos são apresentados na Tabela 5.8. Os casos realizaram mesma ação da Metodologia Base atingindo o objetivo, que é isolar o trecho onde ocorreu a falta, deixando a carga L51 isolada.

TABELA 5.8 – RESULTADOS REFERENTES A PRIMEIRA ETAPA DA METODOLOGIA: FALTA NO TRECHO 52 COM GD

Metodologia	Falta Aplicada	Chaves isolam o trecho com defeito	Demanda do trecho isolado (MVA)	Zonas Isoladas	Zonas fora de serviço o pós-falta	Demanda Total das Zonas Fora de serviço (MVA)
Base	Trecho 52	S52 e S53	L51:0,0648	Z29	Z30 a Z38	1,316
Base Implementada	Trecho 52	S52 e S53	L51:0,0648	Z29	Z30 a Z38	1,316
Proposta Implementada	Trecho 52	S52 e S53	L51:0,0648	Z29	Z30 a Z38	1,316

Fonte: O autor, 2015.

Após a falta ter sido isolada, inicia-se o processo de autorrecuperação das cargas que ficaram fora de serviço. A Tabela 5.9 apresenta a sequência do chaveamento dos três casos considerando geração distribuída.

Para recuperar as cargas fora de serviço, nos três casos o alimentador AL1 assumiu parte das cargas do alimentador AL4. Para recuperar todas as cargas na Metodologia Base e Metodologia Base Implementada foram realizados chaveamentos abrindo a chave S63, fechando as chaves S69 e S72. Comparando com a Metodologia Proposta neste trabalho o número de chaveamento foi o mesmo, porém, a metodologia identificou que o alimentador AL3 possui capacidade de assumir as Zonas 37 e Z36 de forma sequencial, abrindo a chave S66 e fechando as chaves S69 e S72. A diferença de chaveamento está ligada à implementação da metodologia que considera a classificação de prioridade das cargas de forma individual.

TABELA 5.9 – SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO DA FALTA NO TRECHO 52 COM GD

Sequência	Metodologia Base		Metodologia Base Implementada		Metodologia Proposta Implementada	
	Ações	Chaves	Ações	Chaves	Ações	Chaves
1	Abre	S63	Abre	S63	Abre	S66
2	Fecha	S69	Fecha	S69	Fecha	S69
3	Fecha	S72	Fecha	S72	Fecha	S72

Fonte: O autor, 2015.

Os valores de pré-falta de tensão mínima e perdas apresentados na Tabela 5.10 são referentes à Metodologia Base implementada e da Metodologia Proposta, pois a Metodologia Base não apresenta os resultados de pré-falta do terceiro cenário.

TABELA 5.10 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PRÉ-FALTA E PÓS-RECONFIGURAÇÃO: FALTA NO TRECHO 52 COM GD

		Pré-falta	Metodologia Base	Metodologia Base Implementada	Metodologia Proposta Implementada
			Pós-reconfiguração	Pós-reconfiguração	Pós-reconfiguração
Tensão (p.u.)	V_{min}	0,936	0,9106	0,9058	0,910
Perdas	MW	0,121	0,19246	0,19686	0,1878
	Mvar	0,111	0,1711	0,16854	0,1658

Fonte: O autor, 2015.

Da mesma forma que os resultados sem considerar geração distribuída, os resultados de tensão mínima entre os casos não tiveram diferença significativa, a pouca diferença é devido ao fato da diferença dos chaveamentos realizados pelas metodologias aplicada aos casos.

5.2 CASO II – FALTA NO ALIMENTADOR 3 TRECHO 31

Um dos objetivos da simulação é a possibilidade de realizar ilhamento intencional durante o processo de autorrecuperação, ou caso de um ilhamento forçado, se ocorrer uma situação em que uma falta cause uma interrupção em uma determinada área importante e não possua opção de ser restaurada por falta de interligações no sistema de distribuição. No Caso II, as simulações realizadas são referentes à Metodologia Base e a Metodologia Proposta neste trabalho. Os resultados da simulação são baseados em um curto-circuito ocorrido no alimentador 3 ramo 31 durante o período de carga pesada em ambos os casos.

A rede de distribuição com quatro alimentadores e duas subestações foi dividida em zonas, que compreendem todo trecho entre duas ou mais chaves. Cada zona pode conter uma ou mais cargas conectadas. Essas zonas são referentes à área de atuação dos agentes Zona, descritos no capítulo anterior. A rede apresentada em Zidan; E-Saadany (2012) é adaptada para o desenvolvimento do presente trabalho. As adaptações necessárias para apresentar o desenvolvimento deste trabalho foram a inserção de geração distribuída nas barras de carga L22 e L43, e as divisões das áreas que correspondem às zonas apresentadas na metodologia proposta conforme ilustra a Figura 5.2.

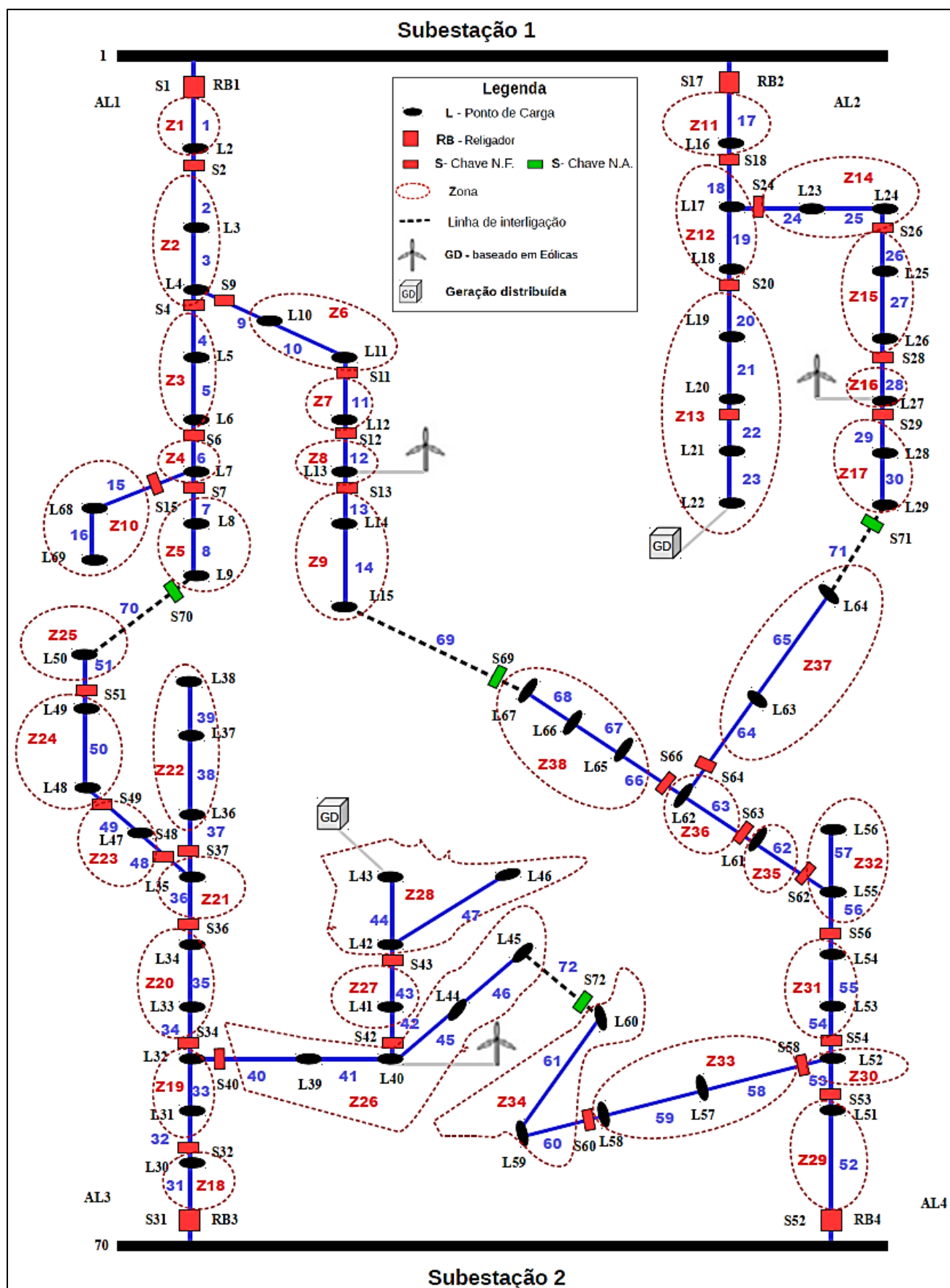


Figura 5.2 – Rede de distribuição com quatro alimentadores e duas subestações
 Fonte: Adaptada de Zidan; E-Saadany (2012)

As demandas totais da rede de distribuição na simulação são apresentadas na Tabela 5.11. Os valores de geração distribuída (GD) apresentam um resultado diferente entre a simulação de pré-falta e o de pós-reconfiguração. A diferença acontece pelo fato das gerações conectadas nas barras de carga L40 e L43 terem sido desconectadas, devido as cargas do alimentador terem sido transferidas para outro alimentador.

TABELA 5.11 – VALORES DE DEMANDA DO SISTEMA COM GD: FALTA NO TRECHO 31

Simulação	Metodologia Base Implementada		Metodologia Proposta Implementada	
	Demanda do Sistema (MVA)	GD (MW)	Demanda do Sistema (MVA)	GD (MW)
Pré-falta	5,585	2,5	5,585	2,5
Pós-reconfiguração	4,925	1,5	5,142	2,0

Fonte: O autor, 2015

Após o curto-circuito, na Metodologia Proposta Implementada, os agentes Dispositivo identificaram a falta e isolaram a zona do defeito. Na Metodologia Base Implementada, os agentes zona identificaram e informaram o agente alimentador (Iniciador) para que o mesmo possa isolar a falta. Os resultados deste processo que indicam qual trecho a falta foi identificada, quais chaves foram abertas, quais zonas e cargas ficaram isoladas, quais zonas fora de serviço e os valores de demanda das zonas fora de serviço estão ilustrados na Tabela 5.12. Para ambos os casos, os resultados foram iguais, identificaram e isolaram a falta deixando preparado para iniciar o processo de recuperação das cargas.

TABELA 5.12 – RESULTADOS REFERENTES À PRIMEIRA ETAPA DA METODOLOGIA: FALTA NO TRECHO 31

Metodologia	Falta Aplicada	Chaves abertas para isolar o trecho com defeito	Demanda do trecho isolado (MVA)	Zonas Isoladas	Zonas fora de serviço pós-falta	Demanda Total das Zonas Fora de serviço (MVA)
Base Implementada	Trecho 31	S31 e S32	L31:0,0975	Z18	Z19 a Z28	1,67
Proposta Implementada	Trecho 31	S31 e S32	L31:0,0975	Z18	Z19 a Z28	1,67

Fonte: O autor, 2015.

Na Tabela 5.13 são apresentados os resultados da capacidade disponível de cada alimentador (CDA) envolvido na negociação em cada caso. Os valores apresentados são resultados das equações 4.16 a 4.18. Para ambos os casos a disponibilidade dos alimentares são iguais, o alimentador AL1, AL2 e AL4 da Metodologia Base Implementada são Iguais ao da Metodologia Proposta neste trabalho.

A Metodologia Proposta é iniciada na segunda etapa, na qual o agente AAL3 inicia o processo de negociação trocando mensagens com outros agentes alimentadores (AAL) e compara os valores dos CDAs enviados pelos agentes alimentadores vizinhos de opção 1, que neste caso são os agentes AAL1 e AAL4. O alimentador AL1 é o escolhido por ter uma disponibilidade maior que o alimentador AL4. Contudo, o AL1 não tem disponibilidade suficiente para assumir todas as cargas fora de serviço do alimentador AL3, por isso é necessário iniciar a próxima etapa da metodologia. A próxima é a terceira etapa, em que inicia-se a construção de uma tabela de relacionamento entre zonas, cargas e demanda. Sendo assim, o agente AAL3, através da tabela de relacionamento, verifica as combinações de todas as zonas fora de serviço para restaurar as cargas pelo alimentador AL1.

TABELA 5.13 – DADOS COMPARATIVOS DA NEGOCIAÇÃO DOS AGENTES ALIMENTADORES: FALTA NO TRECHO 31

Simulação	CDA AL 1 (MVA)	CDA AL 2 (MVA)	CDA AL 4 (MVA)
Metodologia Base Implementada	0,8220	0,8387	0,505
Metodologia Proposta Implementada	0,8220	0,8387	0,505

Fonte: O autor, 2015.

Para que o alimentador AL1 assuma as cargas de uma combinação de zonas do alimentador AL3, é utilizado o critério de escolha da demanda máxima da combinação, ou seja, a máxima demanda que o alimentador AL 1 pode assumir das combinações que estão conectados ao alimentador AL1. Após a escolha, o agente AAL3 atualiza a tabela de chaves ações de chaveamento para aquela combinação. Em seguida, o AAL3 atualiza a tabela de relacionamento das zonas, averigua as que ainda ficaram fora de serviço e inicia uma verificação de combinação para que o alimentador 4 possa assumir as cargas. Após o agente AAL3 atualizar a tabela e verificar que ainda existem zonas fora de serviço, o agente AAL 1 tenta um subcontrato, sem sucesso, isso porque o alimentador 1 possui outra conexão somente com o alimentador 4, sendo que o mesmo já assumiu cargas do alimentador 3. Na sequência, o agente AAL 4 tenta um subcontrato com o agente AAL2 (opção 2), e consegue transferir parte da sua carga para o alimentador 2. A negociação da transferência de carga é baseada nas equações 4.19 e 4.20. Com base nessas equações, a Tabela 5.14 apresenta a zona transferida, a sua respectiva demanda e o valor disponível para transferência de carga de AL 4 para AL2.

TABELA 5.14 – TRANSFERÊNCIA DE CARGA DO VIZINHO “OPÇÃO 1” PARA O VIZINHO “OPÇÃO 2”: FALTA NO TRECHO 31

	Metodologia Base Implementada	Metodologia Proposta Implementada
Máx. Demanda para Transferência (T) (MVA)	0,2393	0,2393
Zonas Transferidas	Z37	Z37
Demanda da zona Transferida (MVA)	0,09744	0,09744

Fonte: O autor, 2015.

Na Metodologia Proposta Implementada o agente AAL4 transfere carga para o alimentador AL2 e recupera as cargas fora de serviço do alimentado AL3 realizando os chaveamentos necessários para isso. As Tabelas 5.15 e 5.16 apresentam uma sequência de chaveamento realizado pelos agentes que possibilita a recuperação de todas as cargas. A Metodologia Base Implementada apresenta uma sequência de cinco chaveamentos para recuperar todas as cargas fora de serviço. A sequência inicia-se abrindo a chave S40 em seguida fechando a chave S70, continuando na sequência abrindo a S64 e fechando as chaves S71 e S72.

TABELA 5.15 – SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO DA FALTA NO TRECHO 31 DA METODOLOGIA BASE IMPLEMENTADA

Sequência	Ações	Chaves
1	Abre	S40
2	Fecha	S70
3	Abre	S64
4	Fecha	S71
5	Fecha	S72

Fonte: O autor, 2015.

A Metodologia Proposta Implementada apresenta na Tabela 5.16 uma sequência de seis chaveamentos para recupera todas as cargas fora de serviço. A sequência inicia-se abrindo a chave S40 e fechando a chave S70, momento em que o alimentador AL4 assume parte das cargas do alimentador AL3. Abre a chave S64 e fecha a chave 71, transferindo parte da carga do alimentador AL 4 para o AL2,

abre a chave S43 ilhando a Zona Z28. E assim, o AL4 assumi as cargas do alimentador AL3 fechando a chave S72.

TABELA 5.16 – SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO DA FALTA NO TRECHO 31 DA METODOLOGIA PROPOSTA IMPLEMENTADA

Sequência	Ações	Chaves
1	Abre	S40
2	Fecha	S70
3	Abre	S64
4	Fecha	S71
5	Abre	S43
6	Fecha	S72

Fonte: O autor, 2015.

A sequência de chaveamento mostrada nas Tabelas 5.15 e 5.16 refere-se somente às ações concernentes a recuperações das cargas, não contemplando o isolamento da falha.

Mesmo que o ilhamento intencional tenha sido realizado, o agente AAL3 precisa realizar corte de carga para atender as restrições o sistema de tensão e violação de carga dos alimentadores.

A Tabela 5.17 apresenta o resultado do corte de carga e Ilhamento intencional realizado pela Metodologia Proposta Implementada e da Metodologia Base Implementada. Os valores das cargas que foram cortadas e das ilhadas são apresentados em MVA. Na Metodologia Base Implementada foram cortadas onze cargas que totalizam uma demanda de 0,571 MVA. No entanto, a Metodologia proposta neste trabalho realizou o corte seletivo de carga, em que foram cortadas nove cargas totalizando uma demanda de 0,353 MVA. O modelo proposto conseguiu salvar três cargas com uma demanda somada de 0,207 MVA realizando ilhamento intencional da zona Z28.

TABELA 5.17 – RESULTADOS DE PÓS-RESTAURAÇÃO DA FALTA NO TRECHO 31 DE AMBAS AS METODOLOGIAS IMPLEMENTADAS

Pós-reconfiguração	Cargas fora de serviço (Corte de carga)	Corte de carga (MVA)	Ilhamento (zona: carga)	Carga Ilhada (MVA)
Metodologia Base Implementada	L31, L32, L33, L34, L35, L36, L37, L38, L40, L43, L44, L46	0,571	--	---
Metodologia Proposta Implementada	L31, L32, L33, L34, L35, L36, L38, L44	0,353	Z28: L42, L43, L46	0,207

Fonte: O autor, 2015.

Com o resultado dos chaveamentos e a realização de corte seletivo de carga e ilhamento, foi executado um fluxo de carga para verificar as restrições da rede de distribuição. O retorno do resultado do fluxo de carga realizado no MATPOWER é apresentado na Tabela 5.18. A tensão mínima e as perdas tiveram uma diferença nos resultados de pós-reconfiguração, a Metodologia Base Implementada apresentou uma tensão mínima nas barras de carga maior que a da Metodologia Proposta Implementada devido ao corte seletivo de carga, que na Metodologia Base foi maior. Da mesma forma, as perdas foram menores que na Metodologia Proposta Implementada. A explicação está nas cargas que foram cortadas para que o alimentador AL3 pudesse ser atendido.

TABELA 5.18 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PRÉ-FALTA E PÓS-RECONFIGURAÇÃO: FALTA NO TRECHO 31

		Pré-falta	Metodologia Base Implementada	Metodologia Proposta Implementada
			Pós-reconfiguração	Pós-reconfiguração
Tensão (p.u.)	Vmin	0,927	0,921	0,912
	Barra	67	47	37
Perdas (MW)		0,151	0,206	0,210

Fonte: O autor, 2015.

A Figura 5.3 apresenta o resultado das manobras realizadas pela metodologia proposta.

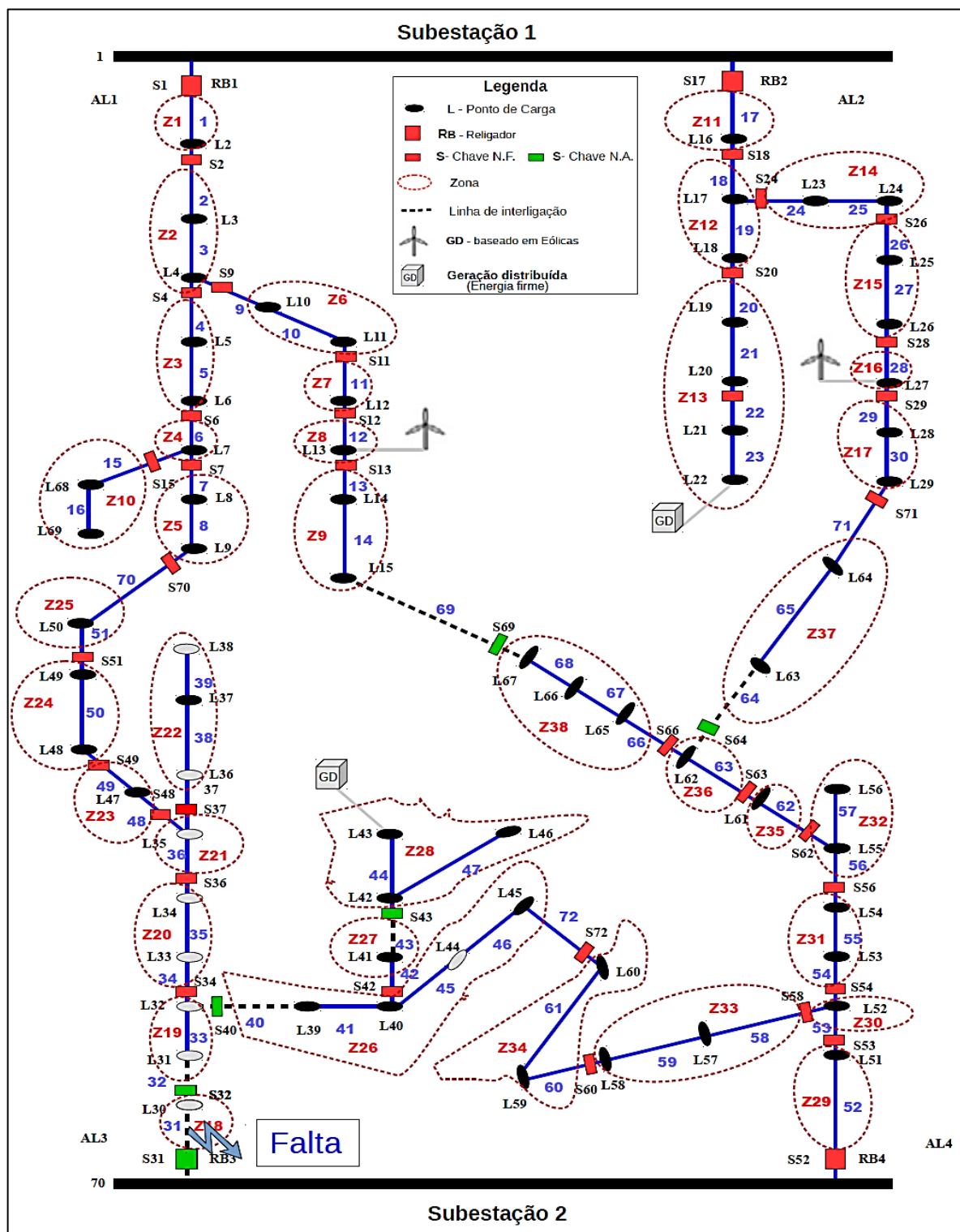


Figura 5.3 – Resultado do chaveamento da Metodologia Proposta: Falta no trecho 31

Fonte: Adaptada de Zidan; El-Saadany (2012)

5.2.1 Análise comparativa

Uma análise comparativa entre os resultados do Caso II é realizada nesta seção. A Figura 5.4 compara os resultados de pré-falta e pós-reconfiguração da Metodologia Base Implementada e da Metodologia Proposta Implementada. Após a ocorrência de uma falta no trecho 31 do alimentador AL3, os resultados de pós-reconfiguração de ambos os casos tiveram uma diminuição em relação ao resultado de pré-falta. Mesmo com o corte seletivo de carga e o ilhamento, essa diminuição dos valores de tensão mínima foi devido ao aumento das perdas após o processo de autorrecuperação das cargas.

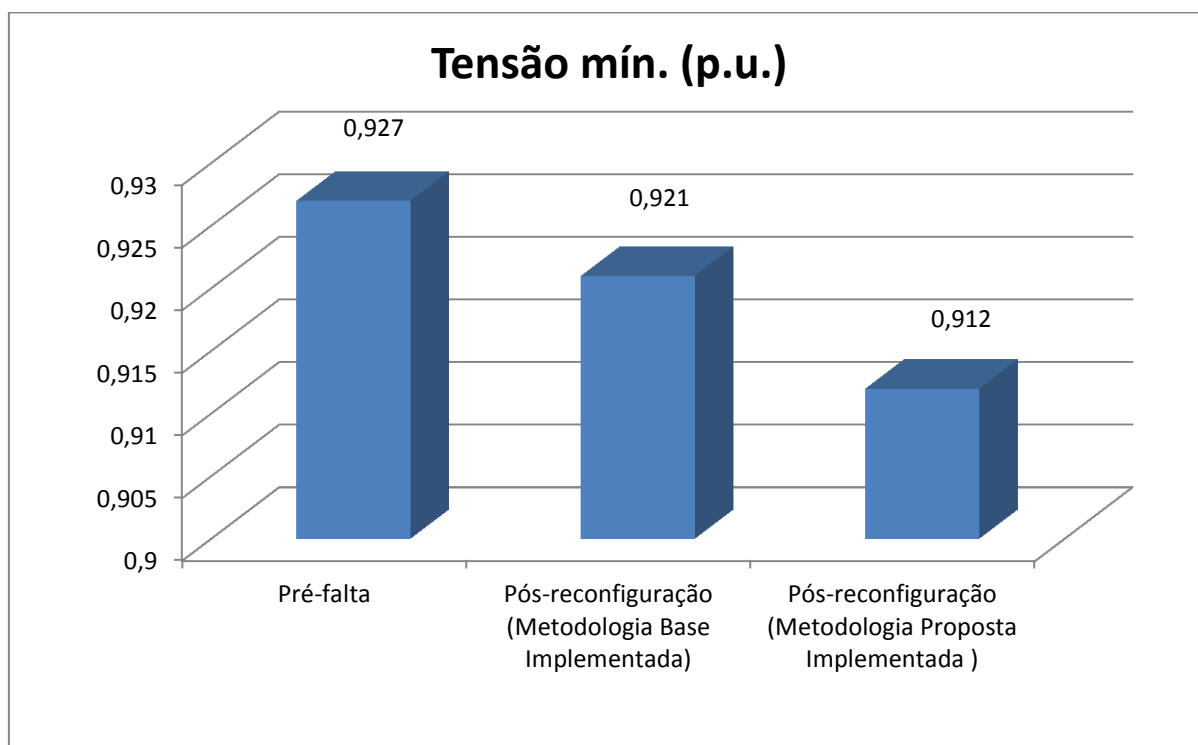


Figura 5.4 – Comparação entre tensões mínimas das Metodologias Implementadas
Fonte: O autor, 2015

Uma comparação entre as perdas na rede de distribuição é ilustrada na Figura 5.5. É possível visualizar um aumento nas perdas da pós-reconfiguração em relação à pré-falta em ambos os casos. Não houve uma diferença significativa nas perdas entre a Metodologia Base implementada e a Metodologia Proposta, mesmo com o ilhamento das cargas na zona Z28, as perdas da Metodologia Proposta foram

maiores que a da Metodologia Base Implementada, isso porque a da Metodologia Proposta assumiu um número maior de cargas em MW.

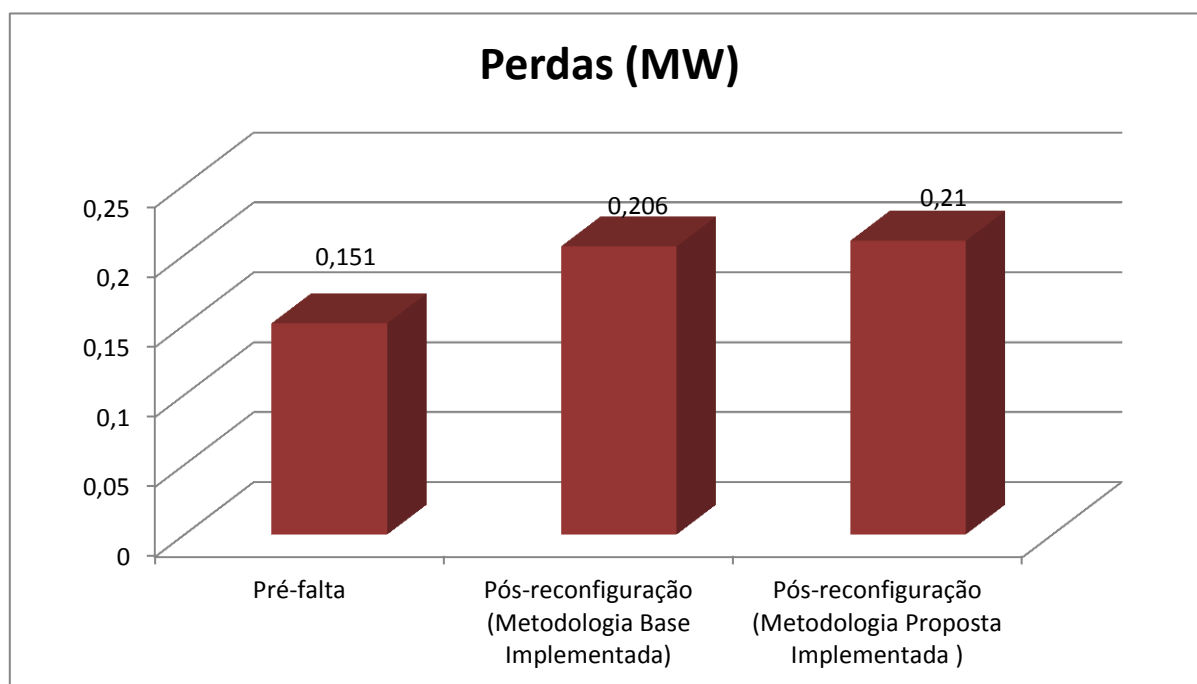


Figura 5.5 – Comparação entre as perdas das Metodologias Implementadas
Fonte: O autor, 2015

Após o processo de autorrecuperação nos dois casos foi necessário realizar corte seletivo de carga para que um maior número de cargas pudessem ser atendidas, principalmente as com maior prioridade como hospitais, quartéis de bombeiros, companhias de fornecimento de água e órgãos públicos. Na Metodologia Base Implementada, o resultado final da autorrecuperação conseguiu restaurar somente 66% das cargas que ficaram fora de serviço. Na Metodologia Proposta Implementada, após o processo de autorrecuperação, a metodologia proposta conseguiu recuperar 79% de toda a carga que havia ficado fora de serviço. Fazendo uma comparação com o percentual de perdas e as cargas restauradas, observa-se que houve um aumento de 36% nas perdas na pós-reconfiguração da Metodologia Base Implementada e um aumento de 39% na pós-reconfiguração da Metodologia Proposta Implementada. A Metodologia Proposta recuperou um percentual em MVA de carga maior do que a Metodologia Base Implementada. Essa avaliação está ilustrada na Figura 5.6 a seguir.

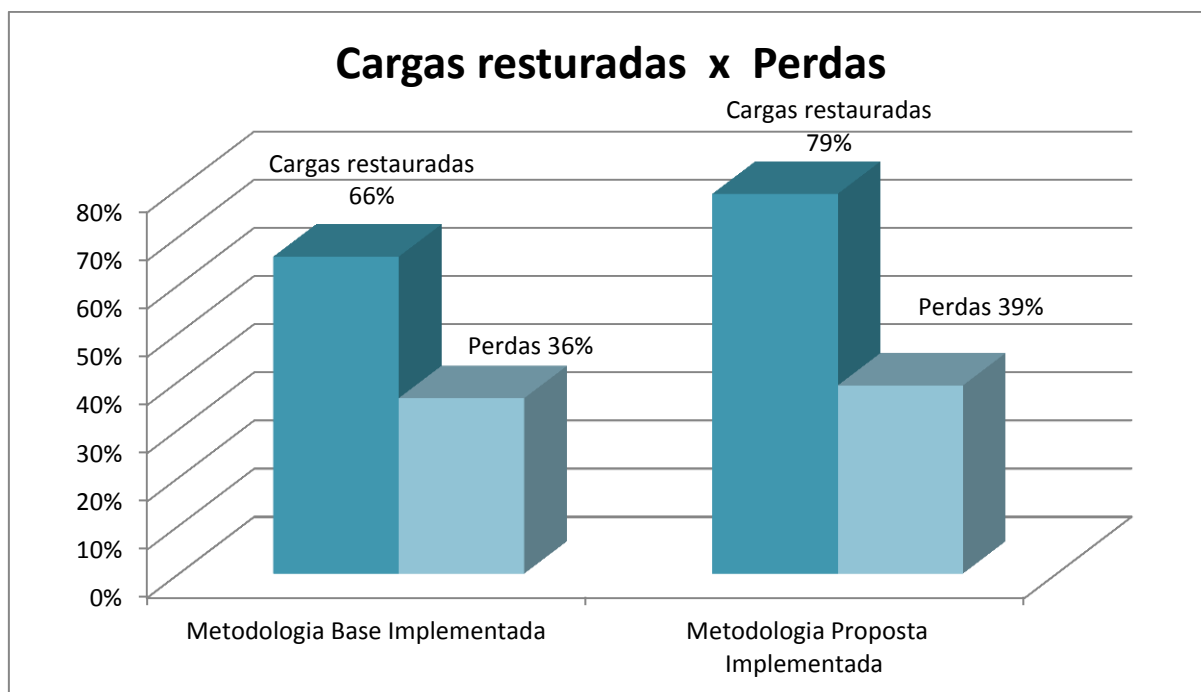


Figura 5.6 – Comparação entre cargas restauradas e perdas das Metodologias Implementadas

Fonte: O autor, 2015

As simulações realizadas apresentaram resultados esperados satisfatórios. Com o objetivo de comparar os resultados obtidos, é possível aplicar uma falta em qualquer ponto da rede elétrica de distribuição para demonstrar como a metodologia proposta se comporta diante dos dois casos.

O corte seletivo de carga em ambos casos atuou de forma correta cortando as cargas de acordo com a prioridade determinada.

Na Metodologia Proposta o ilhamento proposto como parte da metodologia de autorrecuperação se demonstrou eficaz se comportando de forma esperada, auxiliando na restauração de cargas importantes, a fim de manter o atendimento de energia, garantindo a não violação das restrições do sistema.

Na situação em que não existe possibilidade de reestabelecer a área que ficou fora de serviço, o ilhamento salvou as cargas com geração local, melhorando confiabilidade do fornecimento de energia, reduzindo ou retardando a necessidade de reforçar a rede de distribuição para cumprir com as normas legais de confiabilidade e reduzindo custos.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Foram apresentados neste capítulo os resultados das simulações das Metodologias Base, Base Implementada, Metodologia Proposta neste trabalho e uma análise comparativa entre as Metodologias Base Implementada e da Metodologia proposta. Para realizar os experimentos, foi utilizada uma rede de distribuição com quatro alimentadores e duas subestações e foi necessária uma interação entre os softwares Matlab (MATPOWER) e JADE. Os dados de entrada para a execução dos experimentos também continham fontes alternativas de energia. As simulações foram divididas em dois casos: o primeiro, que não considera a geração distribuída e o segundo, que considera a geração distribuída (GDs). Ambos os casos apresentados neste trabalho contemplam o ilhamento intencional e o corte seletivo de carga.

As simulações apresentadas neste capítulo compreendem a falta no ramo 52 da rede de distribuição utilizada em Zidan; El-Saadany (2012), com o objetivo de comparar e analisar os resultados com a Metodologia Base. E uma falta no trecho 31 do alimentador AL3 da rede de distribuição utilizada como teste para demonstrar a eficácia de um ilhamento intencional.

As análises dos resultados apresentados são referentes às tensões mínimas na barra, perdas, ações de chaveamento, bem como as zonas que ficaram fora de serviço e as restauradas.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou os conceitos e estado da arte de *smart grid* e do problema de autorrecuperação em redes elétricas de distribuição, foram analisados trabalhos que apresentam propostas semelhantes utilizando técnicas baseadas em sistema multiagente para resolução do problema de restauração da rede.

Foi apresentada uma proposta de uma metodologia computacional de autorrecuperação de redes de distribuição de energia elétrica, utilizando sistema multiagente. Tal metodologia aqui exposta considera o corte seletivo de carga e o ilhamento com o suporte da geração distribuída. A metodologia ainda contempla quatro tipos de agentes: agente alimentador (AAL), agente zona (AZ), agente dispositivo (AD) e agente geração distribuída (AGD).

Para as simulações, foi realizada uma interação entre a ferramenta computacional de fluxo de carga (MATPOWER) e a metodologia baseada em multiagente sobre a plataforma JADE.

Para testar e validar a metodologia proposta neste trabalho, os resultados das simulações da metodologia proposta foram apresentados comparando-se os resultados das simulações com a Metodologia Base e com a Metodologia Base Implementada. Verificou-se que na ocorrência de um defeito em qualquer parte do circuito, os agentes identificam a falta, isolam a zona com o problema e avisam o agente alimentador para iniciar a negociação. Assim sendo, as contribuições desta dissertação no processo de autorrecuperação de redes elétricas inteligentes, referem-se à implementação do processo de ilhamento intencional com corte seletivo de carga considerando a existência de geração distribuída, e a implementação do processo de identificação/isolamento da falta realizados pelos Agentes Dispositivo “Inteligentes”, denominado neste trabalho de Agente Dispositivo.

Durante o processo, foi possível observar a importância de ter um sistema de autorrecuperação com corte seletivo de carga e ilhamento com geração distribuída firme. Também são estudados os impactos nas variáveis de estado da

rede de distribuição de energia elétrica. Nas simulações apresentadas, o modelo proposto comportou-se de modo satisfatório para a restauração das cargas, execução do ilhamento e corte de carga por prioridade. Constatou-se que há vantagens e a efetividade da metodologia proposta no processo de autorrecuperação com ilhamento intencional com corte seletivo de carga considerando geração distribuída no desempenho do sistema de distribuição de energia elétrica, especialmente, no que se refere na redução de cargas não supridas ou melhoramento da confiabilidade do suprimento de energia elétrica. Cabe ressaltar que a metodologia proposta se insere no contexto de redes elétricas inteligentes, pois engloba os conceitos de tomada de decisão para sistemas de autorrecuperação, inteligência distribuída e geração distribuída seguida de corte de carga por prioridade. Tal metodologia abre possibilidades de trabalhos futuros sobre mesmo contexto aplicado a este trabalho.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos estudos da metodologia proposta neste trabalho, é possível a continuação da metodologia em trabalhos futuros com uso de técnicas de sistemas multiagente aplicado à funcionalidade de sistemas de autorrecuperação e outras funcionalidades dentro do contexto de Redes Elétricas Inteligentes. Com a utilização de técnicas de otimização utilizando sistemas multiagente e com exploração de técnicas de negociação, leilão e formação de coalisão entre agentes são modelos que abrem frente para as pesquisas em sistemas de autorrecuperação e outras funcionalidades das Redes Elétricas Inteligentes. A seguir alguns dos pontos de pesquisa que podem ser realizadas no futuro com base na proposta deste trabalho:

1. Modelo de um Sistema Multiagente com técnica de formação de coalisão para sistemas de Autorrecuperação de redes de distribuição utilizando FPO – Fluxo de Potência Ótimo para ilhamento intencional para sistema de microrredes;

2. Autorrecuperação de redes de distribuição utilizando Sistemas Multiagente com técnica de otimização ADOPT - *Asynchronous Distributed Optimization*;
3. Sistema Multiagente utilizando estratégias de negociação em gerenciamento pela demanda no consumidor;
4. Modelo de um Sistema Multiagente com técnica de otimização ADOPT para controle de *Volt-var* integrado um sistema de Autorrecuperação de redes de distribuição;
5. Modelo baseado em Sistema Multiagente para coordenação de Proteção automática durante o processo de autorrecuperação da rede de distribuição;
6. Metodologia baseada em Sistemas Multiagente utilizando técnicas de leilões em controle da geração distribuída considerando os custos de cada tipo de geração para gerenciamento da demanda;
7. Modelo de um Sistema Multiagente BDI com controle unificado de tensão de Subestação e rede de distribuição para auxílio em sistema de Autorrecuperação.

REFERÊNCIAS

- AMIN, M. Toward self-healing energy infrastructure systems. **Computer Applications in Power, IEEE**, v. 14, n. 1, p. 20–28, 2001.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição**. 2010.
- _____. ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída**. Brasília, DF, 2014.
- ANEEL. Indicadores e Compensação de Continuidade. Disponível em: <website:/http://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 10/6/2015.
- AREFIFAR, S. A.; MOHAMED, Y. A. I.; EL-FOULY, T. H. M. Comprehensive Operational Planning Framework for Self-Healing Control Actions in Smart Distribution Grids. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 28, n. 4, p. 1–9, 2013.
- ASMUS, P. Why Microgrids Are Moving into the Mainstream. **Electrification Magazine, IEEE**, v. 2, n. 1, p. 12–19, 2014. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6774537>. .
- BARROS, J. V. C. **SISTEMA MULTIAGENTE PARA RECOMPOSIÇÃO AUTOMÁTICA DE SUBESTAÇÃO E REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**, 110p, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará – UFC, 2013, 110p.
- BELLIFEMINE, F.; POGGI, A.; RIMASSA, G. Jade - A FIPA-compliant agent framework. Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents - AGENTS '01. **Anais...** . p.216–217, 2001. Disponível em: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=375735.376120>. .
- BLLIFEMINE, F.; CAIRE, G.; GREEMWOOD, D. **Developing Multi-Agent Systems with JADE**. Wiley Seri ed. John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- BOUHAFS, F.; MACKAY, M.; MERABTI, M. Links to the future. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 10, n. 1, p. 24–32, 2012.
- BROWN, H. E.; SURYANARAYANAN, S. A survey seeking a definition of a smart distribution system. **41st North American Power Symposium, NAPS 2009**, v. 80401, p. 1–7, 2009.
- BROWN, R. E. Impact of Smart Grid on Distribution System design. **IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, PES**, 2008.
- CGEE. **Redes Elétricas Inteligentes : contexto nacional**. Brasília, DF, 2012.

CHAKRABORTY, S.; KRAMER, B.; KROPOSKI, B. A review of power electronics interfaces for distributed energy systems towards achieving low-cost modular design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2323–2335, 2009.

CHOWDHURY, S. P.; CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, P. A. UK scenario of islanded operation of active distribution networks with renewable distributed generators. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 33, n. 7, p. 1251–1255, 2011.

CHOWDHURY, S. P.; CHOWDHURY, S. P.; CROSSLEY, P. **Microgrids and Active Distribution Networks**. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2009.

DAS, D. Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 28, n. 5, p. 331–338, 2006.

DONGLI, J. I. A.; XIAOLI, M.; XIAOHUI, S. Study on technology system of self-healing control in smart distribution grid. **China Electric Research Institute**, p. 1–5, 2011.

EISA. Title XIII of the Energy Independence and Security Act of 2007 (EISA). **Security**, v. 2007, n. December, p. 1–311, 2007. Disponível em: <http://frwebgate.access.gpo.gov/cgi-bin/getdoc.cgi?dbname=110_cong_bills&docid=f:h6enr.txt.pdf>. .

ELETROBRÁS. **Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição**. Volume 2, ed. Rio de Janeiro: Coleção Distribuição de energia elétrica, 1982.

ESPINOZA, A.; PENYA, Y.; NIEVES, J. C.; ORTEGA, M.; PENA, A.; RODRIGUEZ, D.; Supporting business workflows in smart grids: An intelligent nodes-based approach. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, n. 3, p. 1384–1397, 2013

FALCÃO, D. M. Smart Grids E Microredes : O Futuro Já É Presente. **VIII Simpase**, p. 1–11, 2009.

DI FAZIO, A. R.; FUSCO, G.; RUSSO, M.; VALERI, S.; NOCE, C. ; AMURA, G.; A smart device for islanding detection in distribution system operation. **Electric Power Systems Research**, v. 120, p. 87–95, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779614002995>>. .

FERNANDES, A. M. DA R. **Inteligência Artificial: Noções Gerais**. Florianópolis, 2003.

FERNANDEZ, S.; RODRIGUEZ, F. J.; SANZ, I.; MATAIX, C.; GIRON, C.; MORANCHEL, M.; BUENO, E. J.; Multi-layer agent-based architecture for smart grid monitoring. **Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE**, p. 3570–3576, 2014.

FIPA-SC23. FIPA Agent Management Specification. Disponível em: <<http://www.fipa.org/specs>>. Acesso em: 20/6/2014.

FIPA-SC29. FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification. **Online: Foundation for Intelligent Physical Agents - <http://www.fipa.org/>**, 2002. Disponível em: <<http://www.mit.bme.hu/projects/intcom99/9106vimm/fipa/XC00029E.pdf>>. .

FIPA-SC67. FIPA Agent Message Transport Envelope. **Online: Foundation for Intelligent Physical Agents - <http://www.fipa.org/>**, 2002. Disponível em: <<http://www.fipa.org/>>. .

HAN, Y.; XU, L. A survey of the smart grid technologies: Background, motivation and practical applications. **Przegląd Elektrotechniczny**, v. 87, n. 6, p. 47–57, 2011.

HIRODONTIS, S.; LI, H.; CROSSLEY, P. A. Load shedding in a distribution network. **2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply**, p. 1–6, 2009.

HUANG, M. Y.; CHEN, C. S.; LIN, C. H. Innovative service restoration of distribution systems by considering short-term load forecasting of service zones. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 27, n. 5-6, p. 417–427, 2005.

IEA. Technology Roadmap Smart Grid. **International Energy Agency**, p. 52, 2011.

IEC-SG3. **IEC Smart Grid Standardization Roadmap**. 2010.

IEEE STD 1547. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems Standards. , 2008. New York, NY 10016-5997, USA: 2003.

IEEE STD 1547.4. **IEEE Guide for Design , Operation , and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems IEEE Standards Coordinating Committee 21 Sponsored by the**. 2011.

IEEE STD 1547.6. IEEE Recommended Practice for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems Distribution Secondary Networks. , 2011. New York, NY 10016-5997,.

IEEE-PES. Distribution Automation Tutorial - Chapter 1. **website:http://wiki.powerdistributionresearch.com/index.php?title=IEEE/PES_Distribution_Automation_Tutorial_2007/2008**, p. 1–16, 2010.

JADE. Technical Description _ Jade Site. Disponível em: <<http://jade.tilab.com/technical-description>>. Acesso em: 14/5/2015.

JENNINGS, N. R. On agent-based software engineering. **Artificial Intelligence**, v. 117, n. 2, p. 277–296, 2000. Elsevier Science Publishers B.V.

JENNINGS, N. R.; BUSSMANN, S. Agent-based control systems: Why are they suited to engineering complex systems? **Control Systems, IEEE**, v. 23, n. 3, p. 61–73, 2003.

JENNINGS, N. R.; SYCARA, K.; WOOLDRIDGE, M. A Roadmap of Agent Research and Development. , v. 38, p. 7–38, 1998. Disponível em: <<http://eprints.soton.ac.uk/252112/>>. .

KAGAN, N.; GOUVEIA, M.; MAIA, F.; DUARTE, D.; LABRONICI, J.; GUIMARÃES, D. S.; NETO, A. B.; PARTICELLI, F.; **Redes Elétricas inteligentes no Brasil: análise de custos e benefícios em um plano nacional de implantação**. 1 ed ed.Rio de Janeiro: Synergia; iABRADEE; Brasília: ANEEL, 2013.

KARADY, G. G. ENERGY DISTRIBUTION. In: E. R. C. Dorf (Org.); **The Electrical Engineering Handbook**. p.1504 – 1513, 2000. Arizona State University.

KATEEB, I. A.; BIKDASH, M.; CHOPADE, P. Back to the future renewable energy sources and green smart grid. **Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON**, p. 147–152, 2011.

KATO, T.; KANAMORI, H.; SUZUOKI, Y.; FUNABASHI, T. Multi-Agent Based Control and Protection of Power Distribution System - Protection Scheme with Simplified Information Utilization. , p. 49–54, 2005.

KATTIRAEI, F.; IRAVANI, R.; HATZIARGYRIOU, N.; DIMEAS, A. Microgrid Management, Controls and Operation Aspects of Microgrids. **IEEE power & energy magazine**, , n. june, p. 54–65, 2008.

KEARNS, D.; ALI, N. Batteries included. **Professional Engineering**, v. 23, n. 15, p. 49–54, 2010.

KUMAR, Y.; DAS, B.; SHARMA, J. Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 1, p. 261–270, 2008.

LAGHARI, J. A.; MOKHLIS, H.; HALIM ABU BAKAR, A. B.; KARIMI, M.; SHAHRIARI, A. An intelligent under frequency load shedding scheme for islanded distribution network. **2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO 2012 - Conference Proceedings**, , n. June, p. 40–45, 2012.

LASSETER, R.; AKHIL, A.; MARNAY, C.; et al. **Integration of Distributed Energy Resources**. California, 2003.

LASSETER, R. H.; PAIGI, P. Microgrid: A conceptual solution. **PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference**, v. 6, p. 4285–4290, 2004.

LEITÃO, P. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 22, n. 7, p. 979–991, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197608001437>. .

LEITAO, P.; VRBA, P.; STRASSER, T. Multi-agent systems as automation platform for intelligent energy systems. **IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)**, p. 66–71, 2013.

LESSER, V. R. Cooperative multiagent systems: A personal view of the state of the art. **IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering**, v. 11, n. 1, p. 133–142, 1999.

LI, C.; CAO, C.; CAO, Y.; KUANG, Y.; ZENG, L.; FANG, B. A review of islanding detection methods for microgrid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 211–220, 2014. Elsevier. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114002536>. .

LIMA, C. A. F.; JANNUZZI, G. D. M. Smart grids – Redes Inteligentes parte VI. **O Setor Elétrico**, p. 46–58, 2011. Disponível em: http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed70_fasciculo_smart_grids_cap6.pdf. .

LIMA, R. L. **Análise de requisitos técnicos para ilhamento intencional de geradores síncronos distribuídos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

LIU, H.; XINGYING CHEN; YU, K.; HOU, Y. The Control and Analysis of Self-Healing Urban Power Grid. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID**, v. 3, n. C, p. 1119–1129, 2012.

M. NIAKI, A. H.; AFSHARNIA, S. A new passive islanding detection method and its performance evaluation for multi-DG systems. **Electric Power Systems Research**, v. 110, p. 180–187, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.01.016>. .

MENDONÇA, L. P. **PROPOSTA DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO PARA ILHAMENTO INTENCIONAL DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**, 176 p, Tese, (Doutorado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2014.

MME. **Relatório Smart Grid do Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes**. 2012.

MME; EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa**. Brasília, DF, 2014.

NAGATA, T.; FUKUNAGA, S. An autonomous distributed agent approach to power system restoration. **16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems**, , n. 1, 2011.

NAREYEK, A. Open World Planning as SCSP. **AAAI WEB SITE**, , n. Nareyek 1998, p. 35–46, 2000. AAAI Technical Report WS-00-02. Disponível em: <<https://www.aaai.org/Papers/.../2000/WS-00-02/WS00-02-006.pdf>>. .

NIST. NIST Special Publication 1108 NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards. **Nist Special Publication**, v. 0, n. October, p. 1–90, 2010. Disponível em: <http://www.nist.gov/smartgrid/upload/NIST_Framework_Release_2-0_corr.pdf\nhttp://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf>. .

OUALMAKRAN, Y.; MELENDEZ, J.; HERRAIZ, S. Self-healing for smart grids: Problem formulation and considerations. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe**, p. 1–6, 2012.

REIS, L. P. **Coordenação em Sistemas Multi-Agente: Aplicações em Futebol Robótico e Gestão da Universidade** Tese PhD, FEUP, 2003.

ROHBOGNER, G.; FEY, S. What the term Agent stands for in the Smart Grid Definition of Agents and Multi-Agent Systems from an Engineer's Perspective. 2012 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS). **Anais...** . p.1301–1305, 2012. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6354375>. .

ROTH, D. P. Maximizing protection coordination with self-healing technology. **Papers Presented at the Annual Conference - Rural Electric Power Conference**, , n. September, p. 1–11, 2012.

RUSH, P. **Proteção e Automação de Redes: Conceito e Aplicação**. 1º ed. São Paulo - SP: Editora Blucher: Schneider, 2011.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence - A Modern Approach**. Second Edi ed. Saddle River, New Jersey, 2003.

S. MASSOUD AMIN; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid. **Power**, , n. october, p. 34–41, 2005.

SARAIVA, F. D. O. **Aplicação de Sistemas Multiagentes para Gerenciamento de Sistemas de Distribuição tipo Smart Grids**, 2012. São Carlos. 115 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012

SCHULZ, N. N.; SOLANKI, J. M.; KHUSHALANI, S. A Multi-Agent Solution to Distribution Systems Restoration. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 22, n. 3, p. 1026–1034, 2007.

TALESKI, K.; RAJICID, D. Distribution Network Reconfiguration For Energy Loss Reduction. **Science**, v. 12, n. 1, p. 398–406, 1997.

TSAI, M. S.; PAN, Y. T. Application of BDI-based intelligent multi-agent systems for distribution system service restoration planning. **European Transactions on Electrical Power**, v. 21, n. 5, p. 1783–1801, 2011.

WEISS, G. **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence**. 1999.

WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to Multi-Agent Systems**. Liverpool, UK, 2002.

XIA, S.; LUO, X.; CHAN, K. W. A Framework for Self-healing Smart Grid with Incorporation of Multi-Agents. **Energy Procedia**, v. 61, p. 2123–2126, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610214031191>>. .

YAN, Y.; QIAN, Y.; SHARIF, H.; TIPPER, D. A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 15, n. 1, p. 5–20, 2013.

YOU, H.; VITTAL, V.; YANG, Z. Self-Healing in Power Systems: An Approach Using Islanding and Rate of Frequency Decline Based Load Shedding. **IEEE Power Engineering Review**, v. 22, n. 12, p. 62–62, 2002.

ZIDAN, A. **Network Reconfiguration in Balanced and Unbalanced Loss Reduction and Service Restoration**. 2012.

ZIDAN, A. A. A. **Reconfiguration and Self-healing Mechanisms in Distribution Systems with High Distributed Generation (DG) Penetration**, 2013. Thesis (Doctor of Philosophy). University of Waterloo, Ontario, Canada, 2013.

ZIDAN, A.; EL-SAADANY, E. F. A Cooperative Multiagent Framework for Self-Healing Mechanisms in Distribution Systems. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 3, NO. 3, SEPTEMBER 2012**, v. 3, n. 3, p. 1525–1539, 2012.

ZIDAN, A.; EL-SAADANY, E. F.; EL CHAAR, L. A cooperative agent-based architecture for self-healing distributed power systems. **2011 International Conference on Innovations in Information Technology, IIT 2011**, p. 100–105, 2011.

APÊNDICE A – DADOS DE ENTRADA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Os dados para construção da rede de distribuição com quatro alimentadores, como as impedâncias da rede, limites de corrente de cada trecho, valores das cargas e pontos de conexão entre alimentadores.

TABELA A. 1 – PARÂMETROS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Alimentadores	Zonas	Nº Ramo	De	Para	R (Ω)	X (Ω)	PL (kW)	QL (kVar)	I máx. (A)	Prioridade (Índice)	Nº da Chave	Status da chave
1	1	1	1	2	1,097	1,074	120,0	108,0	270	1	1	1
1	2	2	2	3	1,463	1,432	72,0	48,0	270	0,5	2	1
1	2	3	3	4	0,731	0,716	180,0	156,0	270	0,125	-	-
1	3	4	4	5	0,366	0,358	90,0	60,0	270	0,125	4	1
1	3	5	5	6	1,828	1,790	21,6	13,0	270	0,125	-	-
1	4	6	6	7	1,097	1,074	21,6	17,0	270	0,125	6	1
1	5	7	7	8	0,731	0,716	15,6	12,0	270	0,125	7	1
1	5	8	8	9	0,731	0,716	19,0	13,0	270	0,125	-	-
1	6	9	4	10	1,080	0,734	24,0	12,0	208	1	9	1
1	6	10	10	11	1,620	1,101	19,2	11,0	208	0,25	-	-
1	7	11	11	12	1,080	0,734	60,0	48,0	208	0,5	11	1
1	8	12	12	13	1,350	0,917	126,0	108,0	208	0,5	12	1
1	9	13	13	14	0,810	0,550	30,0	18,0	208	1	13	1
1	9	14	14	15	1,944	1,321	48,0	30,0	208	0,25	-	-
1	10	15	7	68	1,080	0,734	120,0	72,0	208	1	15	1
1	10	16	68	69	1,620	1,101	48,0	36,0	208	1	-	-
2	11	17	1	16	1,097	1,074	72,0	36,0	270	0,5	17	1
2	12	18	16	17	0,366	0,358	48,0	30,0	270	0,125	18	1
2	12	19	17	18	1,463	1,432	18,0	11,0	270	0,125	-	-
2	13	20	18	19	0,914	0,895	15,6	8,4	270	0,125	20	1
2	13	21	19	20	0,914	0,787	36,0	24,0	270	0,125	-	-
2	13	22	20	21	1,133	1,110	108,0	60,0	270	0,125	-	-
2	13	23	21	22	0,475	0,465	60,0	36,0	270	0,125	-	-
2	14	24	17	23	2,214	1,505	72,0	48,0	208	1	24	1
2	14	25	23	24	1,620	1,110	120,0	96,0	208	0,25	-	-
2	15	26	24	25	1,080	0,734	96,0	78,0	208	0,5	26	1
2	15	27	25	26	0,540	0,367	120,0	72,0	208	0,5	-	-
2	16	28	26	27	0,540	0,367	120,0	66,0	208	1	28	1
2	17	29	27	28	1,080	0,734	144,0	84,0	208	0,25	29	1

2	17	30	28	29	1,080	0,734	126,0	84,0	208	1	-	-
3	18	31	70	30	0,366	0,358	96,0	60,0	270	0,5	31	1
3	19	32	30	31	0,731	0,716	72,0	48,0	270	0,125	32	1
3	19	33	31	32	0,731	0,716	15,6	9,6	270	0,125	-	-
3	20	34	32	33	0,804	0,787	19,2	11,8	270	0,125	34	1
3	20	35	33	34	1,170	1,145	60,0	36,0	270	0,125		
3	21	36	34	35	0,768	0,752	48,0	33,6	270	0,125	36	1
3	22	37	35	36	0,731	0,716	72,0	48,0	270	0,125	37	1
3	22	38	36	37	1,097	1,074	48,0	36,0	270	1	-	-
3	22	39	37	38	1,463	1,432	36,0	30,0	270	0,25	-	-
3	26	40	32	39	1,080	0,734	180,0	120,0	208	0,5	40	1
3	26	41	39	40	0,540	0,367	72,0	42,0	208	0,5	-	-
3	27	42	40	41	1,080	0,734	144,0	84,0	208	1	42	1
3	28	43	41	42	1,836	1,248	108,0	72,0	208	0,25	43	1
3	28	44	42	43	1,296	0,881	21,6	12,0	208	0,25	-	-
3	26	45	40	44	1,188	0,807	19,2	12,0	208	0,25	-	-
3	26	46	44	45	0,540	0,367	120,0	60,0	208	0,25	-	-
3	28	47	42	46	1,080	0,734	72,0	48,0	208	0,25	-	-
3	23	48	35	47	0,540	0,367	108,0	84,0	208	0,25	48	1
3	24	49	47	48	1,080	0,734	122,4	79,2	208	0,25	49	1
3	24	50	48	49	1,080	0,734	120,0	84,0	208	0,25	-	-
3	25	51	49	50	1,080	0,734	168,0	108,0	208	0,25	51	1
4	29	52	70	51	0,366	0,358	72,0	48,0	270	0,25	52	1
4	30	53	51	52	1,463	1,432	24,0	13,2	270	0,25	53	1
4	31	54	52	53	1,463	1,432	48,0	36,0	270	0,25	54	1
4	31	55	53	54	0,914	0,895	43,2	28,8	270	0,25	-	-
4	32	56	54	55	1,097	1,074	36,0	24,0	270	0,25	56	1
4	32	57	55	56	1,097	1,074	51,6	36,0	270	0,25	-	-
4	33	58	52	57	0,270	0,183	96,0	60,0	208	0,25	58	1
4	33	59	57	58	0,270	0,183	288,0	144,0	208	1	-	-
4	34	60	58	59	0,810	0,550	150,0	132,0	208	0,5	60	1
4	34	61	59	60	1,296	0,881	30,0	12,0	208	1	-	-
4	35	62	55	61	1,188	0,807	12,0	6,0	208	0,125	62	1
4	36	63	61	62	1,188	0,807	180,0	156,0	208	0,125	63	1
4	37	64	62	63	0,810	0,550	60,0	36,0	208	0,125	64	1
4	37	65	63	64	1,620	1,101	36,0	24,0	208	1	-	-
4	38	66	62	65	1,080	0,734	156,0	144,0	208	0,5	66	1
4	38	67	65	66	0,540	0,367	180,0	156,0	208	0,5	-	-
4	38	68	66	67	1,080	0,734	30,0	18,0	208	0,5	-	-
-	-	69	67	15	0,454	0,363	48,0	30,0	234	-	69	0
-	-	70	9	50	0,681	0,545	120,0	84,0	234	-	70	0
-	-	71	29	64	0,681	0,545	36,0	24,0	234	-	71	0
-	-	72	45	60	0,254	0,203	30,0	12,0	234	-	72	0

Fonte: Adaptado de Das, 2006

TABELA A. 2 – PARÂMETROS DAS SUBESTAÇÕES

Subestação	Barra	P máx. (MW)	P atual (MW)	P mín. (MW)	Q máx. (MW)	Q atual (MW)	Q mín. (MW)
1	1	6,00	4,00	2,00	2,00	2,00	0,50
2	70	6,00	4,00	2,00	2,00	2,00	0,50

Fonte: : Adaptado de Zidan; El-Saadany (2012)

TABELA A. 3 – PARÂMETROS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA - GD

Identificação da DG	Alimentador	Zonas	Barra de carga	P máx. (MW)	P atual (MW)	Status da GD
1	1	8	13	0,50	0,50	1
2	2	16	27	0,50	0,50	1
3	3	26	40	0,50	0,50	1
4	2	13	22	0,50	0,50	1
5	3	28	43	0,50	0,50	1

Fonte: Adaptado de Zidan; El-Saadany (2012).

TABELA A. 4 – PARÂMETRO DE ENTRADA DO FLUXO DE CARGA

Valor de tensão de Base	Número de Barras	Potência de Base	Limite máximo de tensão (p.u.)	Limite mínimo de tensão (p.u.)
11KV	70 Barras	1 MVA	1,05	0,9

Fonte: Zidan; El-Saadany (2012)